

СЕКЦИЯ 16

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Председатель – д.т.н., профессор **Мартынов В.А.**

Секретарь – к.т.н., доцент **Сайкин М.С.**

Е.С. Зайцев, асп.;
рук В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛОМ ПОЛЕ СЕЧЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Высоковольтные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена обладают достаточно большим рядом преимуществ по сравнению со своими аналогами. Но при использовании на практике наряду с достоинствами были выявлены и недостатки. Один из самых существенных – это отсутствие свойства изолирующего материала восстанавливаться после возникновения внутренних разрядов и пробоев, в результате чего растет степень износа изоляции кабеля в процессе эксплуатации [1]. С другой стороны, сшитый полиэтилен наряду с хорошими электроизоляционными свойствами обладает высоким термоизолирующим эффектом. Поэтому пропускная способность, надежность и бесперебойность работы КЛ сильно зависят от температурного режима работы линии и внешних условий прокладки. Особенно это проявляется при эксплуатации в климатических условиях нашей страны, в которых тепловые свойства грунта (теплоемкость и теплопроводность) существенно меняются в зависимости от сезона. Таким образом, существует необходимость исследования температурного поля в сечении КЛ. Помимо того, современные средства мониторинга распределенной температуры по длине линии требуют создания моделей и алгоритмов расчета тепловых переходных процессов в изоляции кабеля.

Исследование распределения температуры и динамики ее изменения было выполнено с помощью программного комплекса COMSOL MULTIPHYSICS на основе метода конечных элементов.

При выполнении расчета кабеля в качестве исходных данных используем данные для кабеля 220 кВ фирмы АВВ представленные в табл. 1. Сечение кабеля представлено на рис. 1.

Таблица 1. Параметры кабеля

Элемент конструкции	Площадь поперечного сечения, мм ²	Наружный диаметр, мм	Материал
1. Токопроводящая жила	1000	37,9	Медь
2. Основная изоляция	–	87,1	СПЭ
3. Экран	265	94,9	Медь
4. Наружная изоляция	–	109	полиэтилен

Примечание: в табл. 1 приведены только основные элементы кабеля (не указаны тонкие промежуточные полупроводящие слои и влагозащитная тонкая алюминиевая оболочка).

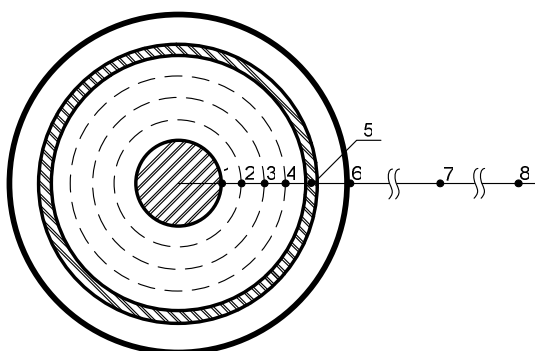


Рис. 1. Сечение кабеля

Допустимый рабочий ток жилы составляет 1368 А при прокладке кабеля в земле и расположении фаз в плоскости. Наведенный ток в экране принят равным 40 % от тока в жиле.

Для проведения расчетов использовались физические параметры [2], [5] и [6], представленные в табл. 2.

Допущения:

- считаем, что плотность тока по сечению провода распределена равномерно (поверхностным эффектом пренебрегаем);
- кабель имеет идеальную цилиндрическую конструкцию, окружающее пространство также обладает осевой симметрией;
- параметры кабеля и окружающей среды не меняются по его длине (плоскопараллельная симметрия). В этом случае тепло распространяется равномерно от оси кабеля к его поверхности и дальше

в окружающую среду, при этом в результате процесса теплопередачи в сечении кабеля образуются изотермы, представляющие собой концентрические окружности;

- температуру окружающей среды считаем постоянной и равной 10 °С (граничное условие 1-го рода).

Таблица 2. Физические свойства материалов и среды

Материал	Удельная проводимость, См/м, при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м ³
Медь	$5,7143 \cdot 10^7$	400	384,18	8960
Полиэтилен	–	0,235	2350	930
Грунт	–	0,4 – 1,2	1515	850

Результаты расчета установившегося режима представлены на рис. 2, а и б. Расчет был выполнен для теплопроводности грунта 1 Вт/(м·К).

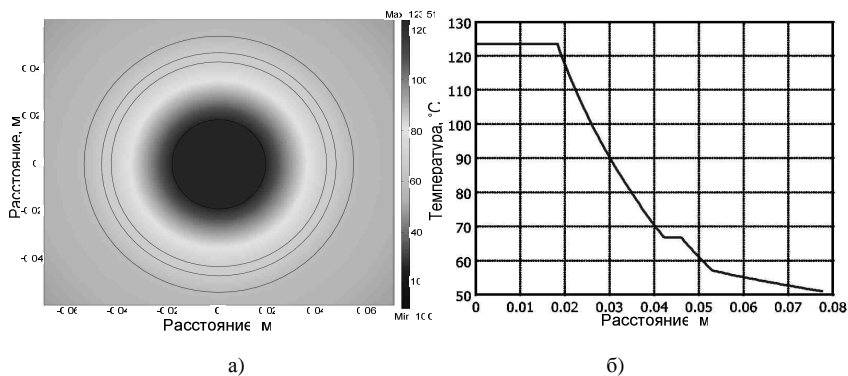


Рис. 2. Распределение температуры в сечении кабеля

На приведенном графике (рис. 2, б) отчетливо видна слабая, почти нулевая, зависимость распределения температуры высокотеплопроводных элементов – жилы и экрана кабеля (горизонтальные полки на графиках). При этом в объеме изоляции из сшитого полиэтилена наблюдается большой градиент температур, что приводит к существенной разнице температур экрана кабеля, где устанавливаются датчики температуры, и центральной жилы.

Для исследования влияния теплопроводности грунта был проведен параметрический расчет теплового поля для значений $\lambda_{гр} = 0,4; 0,5; \dots; 1,2$ Вт/(м·К). Результаты показаны на рис. 3, а и б.

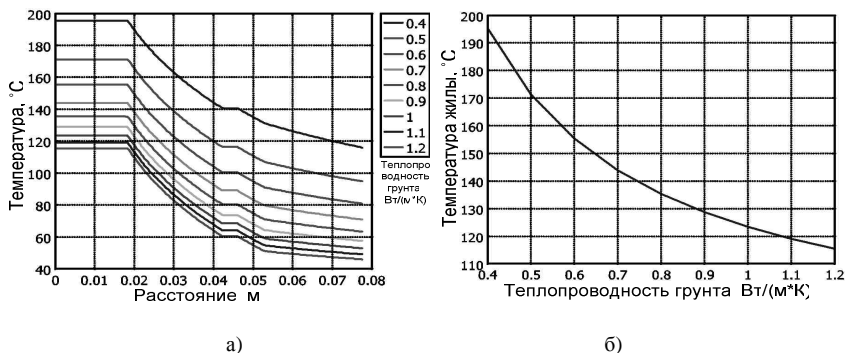


Рис. 3. а) – распределение температуры в сечении кабеля при разных теплопроводностях грунта; б) – зависимость температуры жилы от теплопроводности грунта

График на рис. 3, б показывает, что при снижении теплопроводности грунта температура вблизи жилы резко возрастает, это говорит о том, что пропускная способность кабеля сильно зависит от свойств окружающей среды. Кроме того, теплофизические свойства грунта зависят от его температуры, влажности и плотности, которые, в свою очередь, меняются как сезонно, так и в процессе эксплуатации линии [2], так как из-за нагрева грунт вблизи кабелей высыхает. Таким образом, пропускная способность, рассчитанная на стадии проектирования, и фактическая могут существенно отличаться. Это может привести к преждевременному старению изоляции и выходу из строя кабельной линии.

На основе данных исследований можно сделать вывод о том, что срок службы рассматриваемых кабелей может быть меньше положенных 25 – 30 лет, что и подтверждается на практике.

В странах Европы проблемы эксплуатации кабелей с СПЭ изоляцией, связанные с тепловым режимом решаются с помощью мониторинга распределенной температуры вдоль кабельной линии в режиме реального времени. Для этого используют оптоволоконные датчики, которые прикрепляют к поверхности или вмонтируют в экран кабеля. Основу измерения распределенной температуры составляет метод OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) – оптической рефлектометрии области частоты [4]. В соответствии с которым, производится анализ рассеянного света в кварцевом волокне. В результате этого анализа удается получить величину температуры в зависимости от расстояния и времени. Данный способ диагностики кабеля позволяет приблизительно оценивать фактическую пропускную способность КЛ в реальном времени, предотвращать перегрев изоляции и тем самым увеличивать срок службы кабеля.

Но, поскольку шитый полиэтилен обладает высоким температурным градиентом, температура наиболее нагретого участка сечения кабеля (вблизи жилы) будет резко отличаться от измеренной температуры, а в переходных режимах эта разница увеличивается в несколько раз (это будет показано далее при расчете переходных процессов). В результате, не удастся получить полное представление о распределении температуры по сечению кабеля. Кроме того для выполнения превентивных мер по созданию оптимальных токовых нагрузок КЛ, обеспечивающих непрерывность электроснабжения потребителей и снижение вероятности возникновения аварийных событий необходимо прогнозирование изменения температуры кабеля. Поэтому существует необходимость создания быстродействующего алгоритма расчета температуры кабеля, позволяющего прогнозировать изменение этой температуры с учетом изменения нагрузки линии.

Такой алгоритм был разработан на основе аналогии электрических и тепловых процессов путем расчета электрической схемы замещения (рис. 4). В рассматриваемой схеме источники тока $J_{ж}$ и $J_{э}$ замещают температурный напор, создаваемый током, протекающим по жиле и экрану кабеля, активные сопротивления $R_1 \dots R_8$ – тепловые сопротивления тепловому потоку, емкости $C_1 \dots C_8$ – теплоемкости материалов кабеля, и окружающей среды (грунта). Источник $E_{вн}$ имитирует температуру окружающей среды. Потенциалы точек 1 – 8 на схеме эквивалентны температуре соответствующих точек в сечении кабеля на рис. 1.

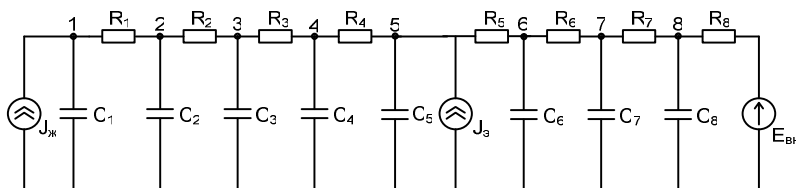


Рис. 4. Схема замещения

Сам алгоритм представляет собой последовательность математических операций, с помощью которых рассчитываются переходные процессы в указанной схеме методом трапеций [3]. Этот метод позволяет составить эквивалентную схему электрической цепи, содержащую только действующие в цепи источники, резистивные элементы, и зависимые источники, заменяющие индуктивные и емкостные элементы.

Рассмотрим замену емкостного элемента (рис. 6, а):

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}, \quad (1)$$

откуда следует, что в момент времени t_k напряжение

$$u_C(t_k) = u_C(t_{k-1}) + \frac{1}{C} \int_{(k-1)h}^{kh} i_C(t) dt, \quad (2)$$

или с применением среднего значения интеграла

$$u_{C,k} = u_{C,k-1} + \frac{h}{2C} (i_{C,k-1} + i_{C,k}). \quad (3)$$

Обозначив

$$\frac{h}{2C} = R_C; \quad E_{C,k-1} = u_{C,k-1} + R_C i_{C,k-1}, \quad (4)$$

получим

$$u_{C,k} = E_{C,k-1} + R_C i_{C,k}. \quad (5)$$

Этому соотношению между напряжением и током емкостного элемента для k -го шага соответствует эквивалентная схема или дискретная модель на рис. 5, б. При постоянном шаге h сопротивление R_L не изменяется от шага к шагу; ток источника зависит от значений тока и напряжения элемента на предыдущем шаге. Источник ЭДС иногда удобнее представить эквивалентным источником тока по формуле:

$$J_{C,k-1} = \frac{E_{C,k-1}}{R_C} = \frac{u_{C,k-1}}{R_C} + i_{C,k-1}. \quad (6)$$

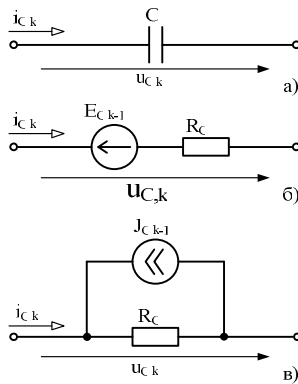


Рис. 5. Дискретная модель емкости

Соотношению 6 соответствует эквивалентная схема (дискретная модель) на рис. 5, в.

Заменяв емкости в исходной схеме их дискретными моделями с источниками тока и напряжения, где это удобно получим схему, изображенную на рис. 6.

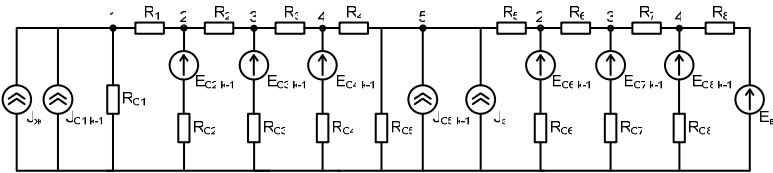


Рис. 6. Дискретная модель схемы замещения

В результате такой замены схему можно рассчитывать с помощью линейных уравнений на одном шаге интегрирования, а сама схема представляет собой дискретную модель электрической цепи. С помощью данного алгоритма был произведен расчет изменения температуры рассматриваемого кабеля при подключении его к нагрузке, изменяющейся в соответствии с графиком на рис. 7, а. При этом, ток в экране составлял 40 % от тока в жиле. Температура окружающей среды была принята равной 10 °C ($E_{\text{вн}} = 10 \text{ В}$). Результаты расчета приведены на рис. 7, б.

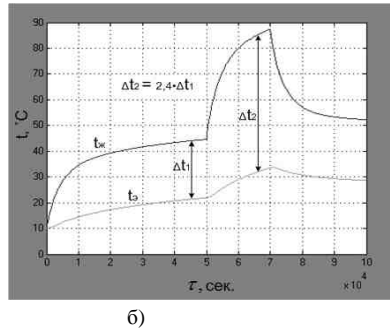
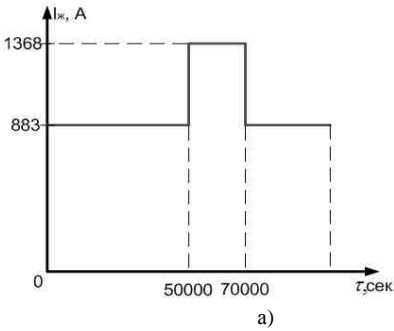


Рис. 7. а) – график изменения тока в жиле кабеля; б) – результаты расчета переходного процесса

Как видно из расчета переходного процесса разница температур жилы и экрана ($t_{\text{жс}}$ и $t_{\text{с}}$) во время импульса резко возрастает, что говорит о невозможности определить температуру изоляции вблизи жилы в переходных режимах. Из всего этого можно сделать вывод о необходимости использования математического моделирования в системах температурного мони-

торинга высоковольтных кабельных линий. Но для возможности их внедрения нужно создать программный модуль, совместимый с программным обеспечением системы, что и будет выполняться в дальнейшей работе.

Библиографический список

1. Кузнецов Д.В., Попова Ю.С., Халилов Ф.Х., Шилина Н.А. К вопросу об эксплуатации силовых кабелей высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена // Электро. – 2009. – № 3. – С. 30 – 33.
2. Титков В.В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля // Кабель-news. – 2009. – № 10. – С. 47 – 51.
3. Основы теории цепей: учеб. для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А. В. Нетушил, С.В. Страхов. – И.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Карпов К.Р. Мониторинг подземных высоковольтных кабельных сетей / Энергослужба предприятия. – 2007. – № 4.
5. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справ. – М.: Атомиздат, 1978.
6. Таблицы физических величин: справ. / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976.

И.Ю. Долгих, инж.;
рук. В.Н. Гречухин, к.т.н., доцент,
В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ СПОСОБОВ И ПРИНЦИПОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Применяемые в настоящее время аналоговые трансформаторы тока выполнены преимущественно на электромагнитном принципе, причем большая часть из них выработала свой нормативный срок службы и нуждается в замене. При этом важной задачей является устранение целого ряда проблем, связанных с эксплуатацией существующих трансформаторов.

Анализ трансформаторов тока в сетях 6 – 10 кВ показывает, что многие из них не обеспечивают свой метрологический класс точности из-за перегрузки по вторичным цепям. Существующие трансформаторы тока имеют искажения формы сигналов в переходных режимах, особенно во время коротких замыканий [2]. Из-за насыщения сердечников трансформаторы тока передают недостоверную информацию о токах коротких замыканий, приводя к задержкам и неселективной работе релейной защиты и автоматики. Традиционные трансформаторы тока не исключают

коммерческих потерь из-за низкого класса точности и возможности хищений электроэнергии [3], основная часть которых приходится на коммунальные сети городов и поселков 6 – 10 кВ и 0,4 кВ.

В сетях 35 – 220 кВ измерительные трансформаторы тока имеют те же проблемы, что и в сетях 6 – 10 кВ. Кроме того, актуальными здесь являются проблемы, связанные с высокой пожаро- и взрывоопасностью, а также высокими массогабаритными показателями и, как следствие, трудностями с ремонтом, монтажом и обслуживанием трансформаторов тока.

Одним из способов решения указанных проблем является разработка и внедрение оптических трансформаторов тока, принцип действия которых основан на эффекте Фарадея, заключающегося в повороте плоскости поляризации линейно поляризованного света за счет магнитного поля, создаваемого током в первичном проводе. Угол поворота плоскости поляризации прямо пропорционален напряженности магнитного поля и длине пути света в веществе:

$$\Theta = V \cdot l \cdot H, \quad (1)$$

где V – постоянная Верде, зависящая от свойств вещества, длины волны света и температуры.

По изменению угла поворота плоскости поляризации определяется ток, протекающий в первичном проводе.

Наряду с неоспоримыми преимуществами [4, 5] оптические трансформаторы тока обладают и недостатками, главным из которых является их высокая стоимость. Оптические трансформаторы тока требуют высокостабильного гарантированного внешнего питания. Кроме того, выходной сигнал оптических трансформаторов подвержен влиянию внешних факторов, таких как температура, вибрация и давление, что может отрицательно сказываться на погрешности измерений.

С точки зрения авторов более перспективной является разработка цифровых трансформаторов тока, принцип действия которых основан на базовых физических законах. Перевод трансформатора из разряда аналоговых приборов в разряд цифровых осуществляется путем установки микропроцессорного блока с АЦП в непосредственной близости с трансформатором тока, что позволяет значительно снизить длину вторичных цепей и сделать минимальным сопротивление нагрузки.

При разработке цифровых трансформаторов возможно использование следующих измерительных датчиков тока:

- электромагнитный трансформатор тока;
- пояс Роговского;
- магнитотранзисторный пояс;

- резистивный датчик тока (токовый шунт).

Рассмотрим каждый из этих датчиков более подробно, выделив преимущества и недостатки каждого из них.

Недостатками электромагнитных трансформаторов тока являются возможность измерения только переменного тока, а также насыщение магнитопровода во время переходных процессов и коротких замыканий при наличии апериодической составляющей, что приводит к существенному возрастанию погрешности в этом режиме.

Достоинствами трансформаторов тока являются обеспечение гальванической развязки между первичной и вторичной обмотками с высоким пробивным напряжением и отсутствие напряжения смещения при нулевом токе. Кроме того, электромагнитные трансформаторы тока не нуждаются в дополнительном источнике питания.

В трансформаторах тока различают два вида погрешностей: токовую и угловую [1], которые определяются согласно формулам (2) и (3):

$$f_{in} = \frac{33,8 \cdot l_m \cdot z_2^{0,6} \cdot I_{2n}^{1,2}}{(I_1 / I_{1n})^{0,4} \cdot f^{0,6} \cdot F_{1n}^{1,6} \cdot S_m^{0,6}} \cdot \sin(\psi + \alpha) \cdot 100, \quad (2)$$

где l_m – средняя длина магнитного потока в магнитопроводе, м; z_2 – комплексное сопротивление вторичной цепи, включающее сопротивления вторичной обмотки и нагрузки, Ом; f – частота переменного тока, Гц; S_m – действительное сечение магнитопровода, м²; ψ – угол потерь; α – фазовый сдвиг между вторичной ЭДС E_2 и вторичным током I_2 .

$$\delta = \frac{119332 \cdot l_m \cdot z_2^{0,6} \cdot I_{2n}^{1,2}}{(I_1 / I_{1n})^{0,4} \cdot f^{0,6} \cdot F_{1n}^{1,6} \cdot S_m^{0,6}} \cdot \cos(\psi + \alpha). \quad (3)$$

Анализ формул (2) и (3) говорит о том, что точность электромагнитного трансформатора тока в рабочих режимах зависит от следующих факторов: первичный и вторичный токи, частота тока, комплексное сопротивление вторичной цепи, средняя длина и материал магнитопровода. По сравнению с существующими аналоговыми класс точности цифрового трансформатора 6 – 10 кВ повышается за счет уменьшения сопротивления вторичной цепи и использования магнитопроводов, выполненных на основе нанокристаллических ферромагнитных сплавов [6]. В сетях 35 – 220 кВ повышение точности также связано с отсутствием необходимости обеспечения высоковольтной изоляции, что позволяет значительно снизить размеры магнитопровода.

Пояс Роговского по своей конструкции аналогичен трансформатору тока. Первичной обмоткой является провод, в котором требуется изме-

ритель ток, а вторичной – катушка с тороидальным сердечником, выполненным из неферромагнитного материала, что обеспечивает линейное преобразование токов больших кратностей. Напряжение, снимаемое с выхода пояса Роговского, в соответствии с законом электромагнитной индукции прямо пропорционально производной тока по времени:

$$u(t) = -M \cdot \frac{di_1(t)}{dt}. \quad (4)$$

Здесь M – взаимная индуктивность, которая определяется по формуле:

$$M = \mu_0 \cdot n \cdot S, \quad (5)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; S – площадь поперечного сечения магнитопровода, м²; n – плотность витков.

Для определения тока выходной сигнал пояса Роговского следует проинтегрировать, пользуясь аналоговыми преобразователями индуцированных сигналов (интеграторы с элементной базой на основе RC-цепочек) или цифровыми методами [7].

Датчики тока на базе пояса Роговского компактны, позволяют измерять токи в широком частотном диапазоне, обладают относительно невысокой стоимостью, обеспечивают гальваническую развязку и ввиду отсутствия ферромагнитного сердечника не насыщаются при больших токах.

Недостатками пояса Роговского являются возможность измерения только переменного тока, сдвиг по фазе между током в первичной цепи и напряжением вторичной обмотки и, как следствие, необходимость интегрирования сигнала для определения измеренного тока.

Магнитотранзисторный пояс – это измерительный датчик тока на основе магнитотранзисторов, представляющих собой биполярные транзисторы, конструкция и рабочий режим которых оптимизированы для получения максимальной чувствительности коллекторного тока к магнитному полю. Магнитотранзисторный пояс работает в линейном диапазоне с токами короткого замыкания, осуществляет преобразование тока в широком спектре частот, включая постоянную составляющую. Существенным недостатком магнитотранзисторного пояса является зависимость выходного сигнала от температуры.

Резистивные датчики тока, принцип действия которых основан на законе Ома, работают в широком диапазоне частот и позволяют измерять как переменный, так и постоянный токи. Они обладают низкой стоимостью и достаточно высокой точностью во всех режимах работы. Недостатком резистивных датчиков тока является необходимость включения датчиков непосредственно в токовую цепь (отсутствие гальванической развязки).

На основании изложенного можно сделать вывод, что при разработке цифровых трансформаторов тока для целей измерения и коммерческого учета электроэнергии в рабочих режимах наилучшим образом подходит малогабаритный трансформаторный датчик тока с магнитопроводом из нанокристаллического ферромагнитного сплава, в качестве резервного датчика может быть использован пояс Роговского. Для целей релейной защиты целесообразно использовать информацию, полученную с резистивного датчика тока, трансформирующего весь спектр частот, включая постоянный ток и аperiodическую составляющую, с высокой точностью. В качестве резервных датчиков могут использоваться магнитотранзисторный пояс и (или) пояс Роговского.

Библиографический список

1. **Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Кибель В.М.** Трансформаторы тока. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989.
2. **Гуревич В.** Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Часть 2. – Компоненты и технологии. – 2010. – № 3. – С. 91 – 96.
3. **Гречухин В.Н., Лебедев В.Д.** К вопросу обоснования экономической эффективности замены аналоговых электромагнитных трансформаторов тока и напряжения цифровыми измерительными преобразователями в электрических сетях // Вестник научно-промышленного общества. – 2011. – Вып. 17. – С. 39 – 46.
4. **Гуртовцев А.** Оптические трансформаторы и преобразователи тока. Принципы работы, устройство, характеристики // Новости электротехники. – 2009. – № 5.
5. **Абраменкова И., Корнеев И., Троицкий Ю.** оптические датчики тока и напряжения // Компоненты и технологии. – 2010. – № 8. – С. 60 – 63.
6. **Стародубцев Ю.** Нанокристаллические магнитомягкие материалы // Компоненты и технологии. – 2007. – № 4. – С. 240 – 242.
7. **Батыгин Ю.В., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А.** Численная обработка результатов измерения импульсных токов поясом Роговского.

С.Ю. Токарев, асп.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПРИМЕНЕНИЕ ОБРАТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАПЛАСА ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

Поверхностный эффект в земле и проводах является функцией частоты [3, стр. 558]. По этой причине параметры многопроводной линии

определяются в частотной области. Теоретически, это позволяет ожидать получения наиболее точных результатов [4, стр. 116].

Само решение системы волновых уравнений в частотной области формируется с помощью введения в рассмотрение модальной системы координат [1].

Расчет переходных волновых процессов в многопроводной системе должен быть произведен во временной области с помощью теоремы о свертке. Для этого предварительно должна быть получена импульсная характеристика $h(t)$ этой системы.

По определению, эту характеристику получают из ее передаточной характеристики $H(s)$ с помощью обратного преобразования Лапласа.

Однако особенностью построения решения в нашем случае является отсутствие непосредственного аналитического представления передаточной характеристики в виде изображения по Лапласу. Все, что мы имеем, – лишь комплексная частотная характеристика $H(j\omega)$, полученная численными методами (т.е. в виде графика или таблицы).

Действительно, решение поставленной задачи аналитически имеет весьма высокую сложность, даже если вообще практически возможно [2, стр. 246; 4, стр. 117]. По этой причине ставка делается на численные методы аппроксимации [2, стр. 243].

Таким образом, ставится новая задача о параметрической идентификации передаточной функции в s -области по известной $H(j\omega)$ в виде отношения двух полиномов [6, п. В.1].

Отметим, что параметры многопроводной системы определяются с использованием бесселевых (трансцендентных) функций. Этот факт определяет наличие у $H(s)$ бесконечно большого числа полюсов [5, стр. 518]. Выбор оптимального порядка $H(s)$ определяется итеративно [3, п. А.5.1.8].

В любом случае, степень числителя такой дроби выбирается меньше степени знаменателя. Это позволяет избежать появления слагаемого, соответствующему, (во временной области) $\delta(t)$. Дельта-функция, математически, представляет мгновенный скачок, что, физически, является прямым нарушением законов коммутации.

Далее эту дробно-рациональную функцию разлагают на простейшие дроби [5, п. 9.2.5.4]. Оригинал (функция времени) для каждой такой дроби находится аналитически. Для действительных полюсов им будет являться экспоненциальная функция, а для пары комплексно-сопряженных – синусоида с экспоненциально-меняющейся амплитудой. Сумма оригиналов таких дробей даст искомую функцию $h(t)$.

В последние десятилетия был произведен достаточно большой объем исследований по аппроксимационному получению $H(s)$ для использо-

вания в программных комплексах типа «EMTP». Наиболее значительных для практического использования успехов добились Таку Нода, Жозе Марти, Бьерн Густавсен и Адам Сэмлен.

Отметим, что обозначенный выше путь получения $h(t)$ не является единственно возможным. Существует еще решение с помощью применения численного обратного преобразования Лапласа, которое может быть сведено к обратному быстрому преобразованию Фурье [4, п. 2.4]. Однако при этом возникает проблема наложения спектров [4, п. 2.2] и появляется эффект Гиббса [4, п. 2.1].

Библиографический список

1. **Токарев С.Ю., Лебедев В.Д.** Уравнения многопроводной линии: практический подход // Энергия-2011: материалы шестой региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов 28 апреля 2011. – В 3 томах. Т. 3. – Иваново: ИГЭУ. – С. 134 – 136.
2. **Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П.** Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения – М., Энергия, 1973.
3. **Martinez-Velasco Juan A.** (ed.). Power System Transients: Parameter Determination – CRC Press, 2009.
4. **Gómez P., Uribe F.A.** The numerical Laplace transform: An accurate technique for analyzing electromagnetic transients on power system devices. – Electrical Power and Energy Systems. – 31(2009). – P. 116 – 123.
5. **Paul C.R.** Analysis of Multiconductor Transmission Lines. – John Wiley & Sons, 2008.
6. **Watson N., Arrillaga J.** Power systems electromagnetic transients simulation. – The Institution of Electrical Engineers, London, 2003.

Ю.И. Козина, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОИЗВОДСТВУ ВАКУУМНОЙ СТАЛИ

Современная техника неразрывно связана с применением тугоплавких металлов, высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов. Оборонная и ряд других промышленности нуждается в вакуумированной, морозоустойчивой стали высокого качества и высокой однородности. Для этого применяется магнитное перемешивание металла, которое обеспечивает наивысшее качество и отсутствие изменения химического состава.

Установки магнитного перемешивания бывают двух типов:

- перемешивание осуществляется непосредственно в печи. Под пчью устанавливается развернутый статор, а в качестве ротора выступает металл;

- перемешивание осуществляется в кристаллизаторе. В корпусе кристаллизатора устанавливается два или более электромагнитов, осуществляющих перемешивание.

Данная установка предоставляет возможность обеспечения высочайшего качества выплавляемого металла, однако имеет несколько недостатков:

- установка сложна в эксплуатации и требует высококвалифицированного персонала для обслуживания;
- высокая стоимость.

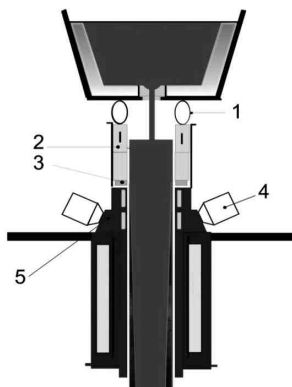


Рис. 1. Кристаллизатор сортовой МНЛЗ с керамической вставкой: 1 – протектор для защиты от вторичного окисления; 2 – керамическая вставка; 3 – пористое кольцо; 4 – ультразвуковой излучатель; 5 – медная часть кристаллизатора

В технологии производства НЛЗ можно выделить следующие основные операции:

- подготовительные операции (подготовка скрапа, подготовка раскислителей, материалов и ферросплавов, загрузка сталеплавильной печи);
 - плавка в электродуговой печи;
 - внепечная обработка стали на печь-ковше;
 - вакуумирование (применяется для высококачественных марок сталей);
 - непрерывная разливка стали, получение квадратной и круглой заготовок;
 - разрезка заготовок;
 - охлаждение и маркировка заготовок;
 - аттестация заготовок, плавок, передача на склад или отгрузка.
- Установка вакуумирования обеспечивает:
- гомогенизацию стали в ковше;
 - точное доведение по химсоставу перед разливкой;
 - снижение содержания серы в стали < 50 ppm;

- получение стали с содержанием углерода $< 0,003 \%$;
- снижение содержания неметаллических включений в стали $< 0,002\%$;
- снижение содержания азота в стали $< 40 \text{ ppm}$;
- снижение содержания водорода в стали $1,5 \text{ ppm}$;
- содержание кислорода в стали $< 30 \text{ ppm}$.

На основе исследования ЦЗЛ серии плавков с ЭМП согласно отчету ММЗ:

- пораженность трещинами в осевой зоне снизилась в среднем на 0,3 балла;
- точечные краевые загрязнения снизились в среднем на 0,2 балла;
- коэффициент осевой ликвации уменьшился до 1,06;
- средний балл по центральной пористости снизился на 0,5 балла, максимальный балл по центральной пористости снизился с 4,0 до 2,5 балла. Центральная пористость носит рассредоточенный характер, размер пор не превышает 2 мм;

• зона равноосных кристаллов при ЭМП составляет 52 (45...65) мм, а без ЭМП – 14 (0...20) мм при температуре перегрева 30...40 °С.

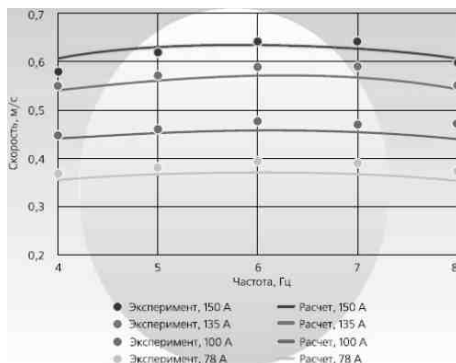


Рис. 2. Зависимость скорости вихревого течения металла от частоты

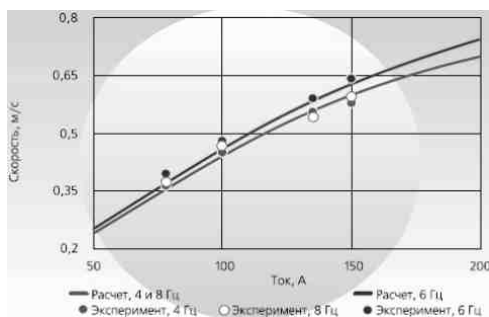


Рис. 3. Зависимость скорости вихревого течения металла от величины тока

В.Д. Карачев, студ.;
рук. А.Н. Голубев, д.т.н., профессор,
В.А. Мартынов, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)

МНОГОФАЗНЫЙ СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

На фоне ужесточения технико-экономических требований, предъявляемых к современным электроприводам (ЭП) переменного тока, задача разработки систем с улучшенными энергетическими показателями сохраняет свою актуальность.

Одним из вариантов реализации системы, обладающей требуемыми характеристиками, является многофазный синхронный ЭП. Его принципиальными достоинствами по сравнению с классическими трехфазными являются более высокая функциональная надежность, уменьшенный уровень шумов, вибраций и радиопомех от ЭП, меньшая критичность к качеству управляющих воздействий, формируемых для исполнительного двигателя, и улучшение показателей его динамических возможностей [1].

Однако исследование подобной системы является довольно трудоемкой задачей, поскольку дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы в синхронной машине, имеют относительно сложный вид, что объясняется индуктивной связью обмоток якоря и индуктора, перемещающихся друг относительно друга в переходных режимах с непостоянной частотой вращения. Также необходимо отметить, что увеличение числа фаз статорной обмотки машины приводит к тому, что метод анализа электромагнитных процессов в двигателе, основанный на использовании одного пространственного вектора и на допущении о синусоидальном распределении поля в зазоре, неприменим. Наличие двух проекций обобщенного вектора на оси декартовой системы достаточно лишь при числе фаз машины $m \leq 3$. При несинусоидальном питании двигателя однозначность прямых и обратных координатных преобразований электромагнитных переменных не соблюдается.

Для решения задачи разработки адекватной модели многофазного СД, которая включала бы в себя сопряжение временных и пространственных гармоник поля, а также учет конфигурации активных частей машины, были соответственно применены аппарат спектральных векторов [3] и программный комплекс Elcut, с помощью которого достаточно удобно на основе заложенных в него средств отражать реальную картину электромагнитных процессов, протекающих в машине. Так же реализована функция автоматизации построения модели исследуемого двигателя, благодаря которой пользователю достаточно задать лишь ряд

параметров проектируемого двигателя, после чего происходит расчет геометрии машины [2] и ее построение. Скриншоты интерфейса расчетной части программы приведены на рис. 1 сверху, геометрическая модель Elcut – рис. 1, снизу.

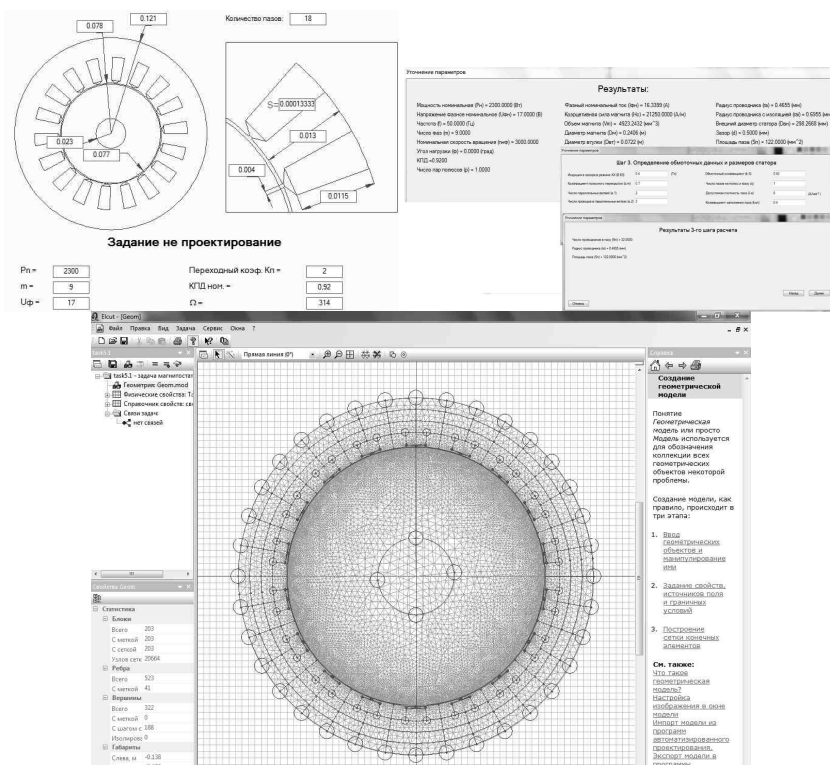


Рис. 1. Интерфейс программы автоматизации (сверху) и Elcut-модель, построенная в соответствии с заданием пользователя (снизу)

Использование описанных инструментов позволило в короткие сроки смоделировать 9-фазный и ему эквивалентный по ряду номинальных параметров (мощность P_n , фазное напряжение статора U_n , скорость ω_n) 3-фазный СД с постоянными магнитами. Результаты сравнительного моделирования в программе Matlab при несинусоидальном питании машин и использовании САУ, реализующей принцип ортогональности спектральных векторов тока статора к продольной оси d , отражены на рис. 3 и рис. 4. Форма питающего напряжения приведена на рис. 2.

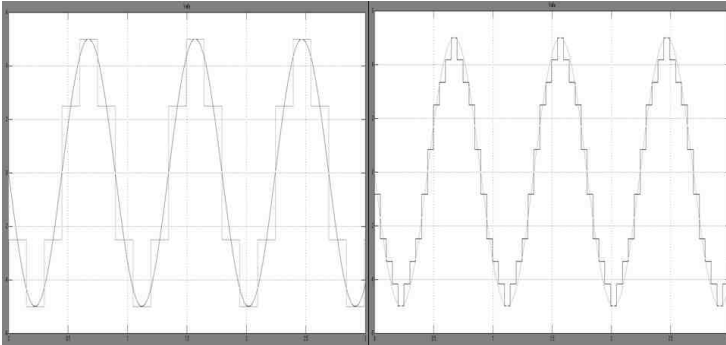


Рис. 2. Слева – форма питающего напряжения фазы статора для статического режима; справа – α -составляющая напряжения в 9-фазной системе для статического режима

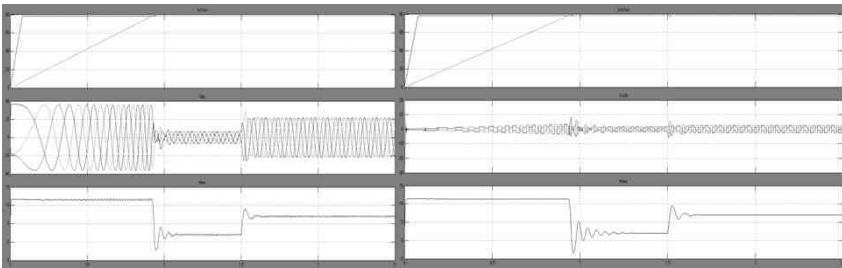


Рис. 3. Пуск исследуемого двигателя на номинальную скорость с последующим набросом нагрузки до номинальной: слева – трехфазная система, справа – девятифазная

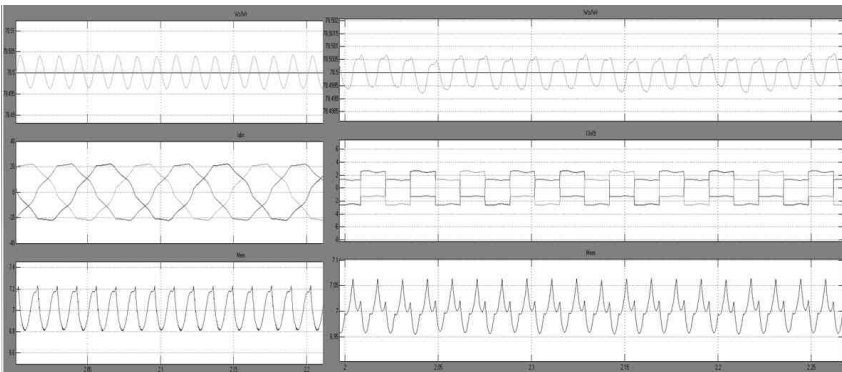


Рис. 4. Увеличенные кривые скорости, тока и момента: слева – для трехфазной системы, справа – для девятифазной

Питание 9-фазной системы напряжением, форма которого представлена на рис. 2 слева, эквивалентно питанию 3-фазной системы напряжением с формой, приведенной на рис. 2 справа. Таким образом, при одинаковой форме несинусоидального питающего напряжения, многофазная система демонстрирует пульсации электромагнитного момента, в четыре реза меньшие по сравнению с трехфазной, а по скорости – меньшие на порядок.

Библиографический список

1. **Голубев А.Н., Лапин А.А.** Многофазный синхронный регулируемый электропривод: научное издание / ГОУВПО ИГЭУ. – Иваново, 2008.
2. **Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н.** Электрические машины с постоянными магнитами; под ред. А. Н. Ларионова. – М.:Л.: Энергия, 1964.
3. **Голубев А.Н.** Математический аппарат приведенных спектральных векторов как основа описания электромагнитных процессов в многофазном асинхронном двигателе / А.Н. Голубев; Иванов. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина. – Иваново, 1996. – Деп. в ВИНТИ 22.11.95. – № 1.

*И.С. Снитъко, ассистент;
рук. В.А. Мартынов, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Одним из важных направлений в теории измерительных трансформаторов является учет динамических процессов, которые возникают при изменении параметров как сети, так и присоединенной нагрузки. Несмотря на обычную ограниченность во времени переходные процессы оказывают сильное влияние на работу измерительных трансформаторов. Заранее выполненный расчет аварийного переходного процесса необходим для наладки автоматической защиты. Анализ переходных процессов в измерительных трансформаторах затруднен нелинейностью магнитной цепи и учетом нагрузки, содержащей в общем случае как индуктивные, так и емкостные элементы. Несмотря на появление в последние годы эффективных численных методов расчета динамических процессов электромагнитных устройств и внедрение в инженерную практику расчетов быстродействующей вычислительной техники анализ переходных режимов, как правило, проводится с использованием метода наложения при-

нужденного и свободного режимов. Очевидно, что такой подход базируется на довольно грубых допущениях и неадекватен возможностям современной вычислительной техники.

В настоящее время при анализе нелинейных динамических схем широко применяется метод переменных состояния [1], который совместим со многими методами численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений и может считаться универсальным методом.

При моделировании процессов в измерительном трансформаторе будем считать, что насыщение магнитной цепи обусловлено только магнитными потоками, замыкающимися по стальным участкам магнитопровода. А потоки рассеяния отдельных ветвей трансформатора, замыкающиеся по немагнитным участкам, могут быть учтены соответствующими линейными индуктивностями рассеяния, которые рассчитываются предварительно с помощью современных численных методов анализа магнитного поля. В качестве примера на рис. 1 приведена конструкция трансформатора [3]. Магнитная цепь трансформатора при любых токах и напряжениях его ветвей может быть представлена схемой замещения с сосредоточенными параметрами, которая будет содержать нелинейные и линейные проводимости и источники МДС [1]. На рис. 2 приведена схема замещения магнитной цепи трансформатора. На рисунке не показаны цепи магнитных потоков рассеяния, так как они практически не влияют на распределение магнитных потоков в стальном сердечнике.

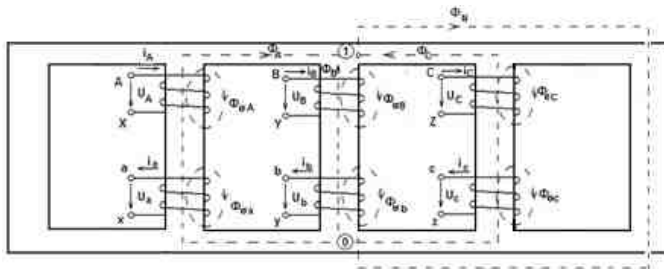


Рис. 1. Магнитная цепь трехфазного пятистержневого трансформатора

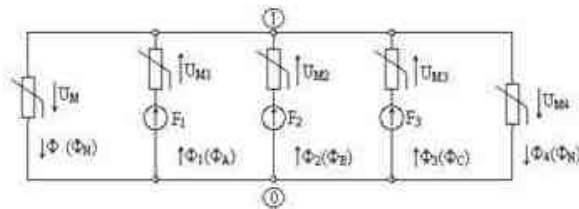


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи трехфазного пятистержневого трансформатора

Как показано в [1], вебер-амперные характеристики каждого нелинейного элемента магнитной цепи $\Phi_k(U_{\cdot k})$ (рис. 3, б) можно рассчитать заранее методами теории поля. Представим каждую k -ю ветвь схемы замещения магнитной цепи трансформатора в виде обобщенной ветви, образованной последовательным соединением нелинейного элемента и источника МДС (рис. 3, а). При кусочно-линейной аппроксимации зависимости $\Phi_k(U_{\cdot k})$ справедливо соотношение

$$\Phi_k = \Lambda_k U_{\cdot k} + J_k, \quad (1)$$

где Λ_k – дифференциальная проводимость k -й ветви; J_k – управляемый напряжением $U_{\cdot k}$ источник магнитного потока.

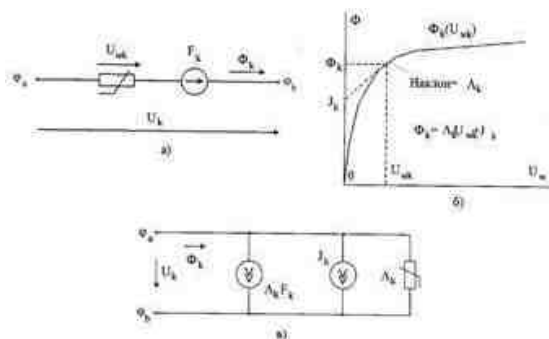


Рис. 3. Обобщенная ветвь схемы замещения магнитной цепи и вебер-амперная характеристика ее нелинейного элемента

Так как напряжение $U_{\cdot k} = U_k + F_k$, то уравнение (1) можно записать в матричной форме следующим образом:

$$[\Phi] = [\Lambda][U] + [\Lambda][F] + [J], \quad (2)$$

где $[\Phi]$ – матрица-столбец магнитных потоков всех ветвей; $[U]$ – матрица-столбец магнитных напряжений на обобщенных ветвях; $[F]$ – матрица-столбец источников МДС всех ветвей; $[\Lambda]$ – диагональная матрица дифференциальных проводимостей ветвей; $[J]$ – матрица-столбец управляемых напряжением источников магнитного потока.

Как показано в [1], величины МДС ветвей схемы замещения магнитной цепи трансформатора $[F]$ могут быть выражены через значения токов ветвей трансформатора $[i_{\%}]$ с помощью сингулярной матрицы преобразования $[C]$:

$$[F] = [C][i_{\%o}]. \quad (3)$$

Матрица $[C]$ имеет число столбцов, равное числу ветвей электрической цепи и число строк, равное числу ветвей схемы замещения магнитной цепи трансформатора. Элементом этой матрицы, расположенном в k -й строке и j -м столбце является число W_k , равное количеству витков с током j -й ветви электрической цепи $i_{\%oj}$, охватывающих k -ю ветвь схемы замещения магнитной цепи. При этом если число витков с током $i_{\%oj}$ создают в k -й ветви МДС, совпадающие с выбранным положительным направлением магнитного потока, то W_k берется со знаком «плюс». В противном случае число W_k берется со знаком «минус».

С учетом (3) уравнение (2) можно записать в виде

$$[\Phi] = [\Lambda][U] + [\Lambda][C][i_m] + [J]. \quad (4)$$

Потокосцепления ветвей трансформатора определяются выражением

$$[\Psi_m] = [C]^T [\Phi] + [L_\sigma][i_m], \quad (5)$$

где элементами матрицы $[L_\sigma]$ являются само- и взаимоиנדуктивности рассеяние ветвей трансформатора.

Элементы матрицы $[L_\sigma]$ целесообразно рассчитывать, используя современные численные методы расчета магнитных полей.

С учетом (2 – 4) выражение (5) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} [\Psi_m] &= [C]^T [\Lambda][U] + [C]^T [\Lambda][C][i_m] + [C]^T [J] + [L_\sigma][i_m] = \\ &= [L_i][i_m] + [C]^T ([\Lambda][U] + [J]), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$[L_i] = [C]^T [\Lambda][C] + [L_\sigma]. \quad (7)$$

Напряжения ветвей измерительного трансформатора

$$[u_{em}] = \frac{d[\Psi_m]}{dt} + [R_m][i_m] = [u_m] + [R_m][i_m], \quad (8)$$

где $[R_T]$ – диагональная матрица активных сопротивлений ветвей трансформатора; $[u_m] = \frac{d[\Psi_m]}{dt}$ – напряжения ветвей, обусловленные ЭДС само- и взаимоиנדукции, как главного поля, так и полей рассеяния.

При кусочно-линейной аппроксимации вебер-амперных характеристик нелинейных элементов магнитной цепи элементы матриц $[\Lambda]$ и $[J]$ являются постоянными при малых изменениях токов ветвей $d[i_T]$, поэтому с учетом (6)

$$[u_m] = [L_i] \frac{d[i_m]}{dt} + [C]^t [\Lambda] \frac{d[U]}{dt}. \quad (9)$$

Уравнения по первому закону Кирхгофа для схемы замещения магнитной цепи трансформатора любого типа можно записать в виде

$$[A][\Phi] = 0, \quad (10)$$

где $[A]$ – редуцированная матрица инцидентий [2].

Ненулевые значения скалярных магнитных потенциалов узлов схемы замещения трансформатора сведем в матрицу-столбец $[\phi]$.

Напряжения ветвей $[U]$ связаны с потенциалами узлов $[\phi]$ соотношением

$$[U] = [A]^T [\phi]. \quad (11)$$

Подставляя в (10) выражения (4) и (11), получим:

$$[A][\Lambda][A]^T [\phi] + [A][\Lambda][C][i_T] + [A][J] = 0. \quad (12)$$

Введем обозначение

$$[\Lambda_m] = [A][\Lambda][A]^T. \quad (13)$$

Размерность матрицы $[\Lambda_m]$ обычно невелика и зависит от выполнения магнитопровода трансформатора. Так для трансформатора, изображенного на рис. 1, матрица $[\Lambda_m]$ представляет собой скаляр.

С учетом (13) магнитные потенциалы узлов $[\phi]$ выразим через токи ветвей трансформатора $[i_m]$:

$$[\phi] = -[\Lambda_m]^{-1} [A][\Lambda][C][i_m] - [\Lambda_m]^{-1} [A][J]. \quad (14)$$

Тогда с учетом (11)

$$\frac{d[U]}{dt} = -[A]^T [\Lambda_m]^{-1} [A][\Lambda][C] \frac{d[i_m]}{dt}. \quad (15)$$

Обозначим

$$[L_m] = [L_i] - [C]^T [\Lambda][A]^T [\Lambda_m]^{-1} [A][\Lambda][C]. \quad (16)$$

Тогда напряжения ветвей трансформатора, обусловленные ЭДС само- и взаимной индукции $[u_m]$ (9), можно выразить через производные токов ветвей:

$$[u_m] = [L_m] \frac{d[i_m]}{dt}. \quad (17)$$

Выражение (17) по виду ничем не отличается от уравнения связи между током и напряжением на линейных индуктивностях схемы замещения электрической цепи. Уравнения переменных состояния относительно токов ветвей измерительного трансформатора $[i_m]$ с учетом (17) и (8) будут иметь следующий вид:

$$\frac{d[i_m]}{dt} = [L_m]^{-1} ([u_{em}] - [R_m][i_m]). \quad (18)$$

При известных начальных условиях (18) решается известными методами численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений на ЭВМ, при этом токи $[i_m]$ на каждом шаге интегрирования являются известными. Зная токи ветвей $[i_m]$, из решения магнитной цепи [1], можно найти потоки $[\Phi]$ и рассчитать элементы матрицы $[L_m]^{-1}$. Первичные напряжения ветвей при расчете трансформатора обычно считаются известными, а вторичные напряжения, входящие в матрицу $[u_{em}]$, могут быть определены на каждом шаге интегрирования по вольт-амперной характеристике дуги через вторичные токи, входящие в матрицу $[i_m]$.

Предложенная математическая модель электромагнитных процессов является универсальной и позволяет анализировать как статические, так и динамические процессы в измерительных трансформаторах самых различных конструкций.

Библиографический список

1. **Мартынов В.А.** Современные модели и методы расчета нелинейных электромеханических устройств. – Иваново, 2000.
2. **Чуа Л.О., Лин Пен-Мин** Машинный анализ электронных схем: алгоритмы и вычислительные методы; пер. с англ. – М.: Энергия, 1980.
3. **Рожкова Л.Д., Козулин В.С.** Электрооборудование станций и подстанций: учеб. для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

*К.Н. Огурцов, к.т.н., Т.Ю. Дунаева, к.т.н.;
рук. С.Ю. Архангельский, д.т.н., профессор
(СГТУ, Саратов)*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЧ ДЕФРОСТАЦИИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

В настоящее время при проведении строительных работ на различных объектах в зимний период одной из проблем является быстрая и эффективная разморозка грунта для прокладки кабелей и коммуникаций, установки фундаментов. Существующие способы разморозки (например, с помощью огня либо пара), требуют больших трудозатрат и не являются экономически выгодными [1]. Процесс оттаивания характеризуется не только большой энергоемкостью, но и значительной продолжительностью по времени (18 ÷ 40 часов и более) и сложностью монтажа установок, требующих частого подключения большого количества элементов оборудования. Оттаивание возможно при уровне грунтовых вод ниже глубины промерзания не менее 1 м.

Таким образом, работа по созданию энергоэффективной установки для размораживания грунта с СВЧ энергоподводом представляется актуальной. Технологические преимущества таких установок перед альтернативными позволят решить проблему быстрого размораживания грунта при обеспечении максимальной экономической эффективности.

В ходе исследований было проведено математическое моделирование процесса нагрева мерзлого грунта при облучении его СВЧ электромагнитной энергией. Принято, что излучающая система состоит из 8 рупорных антенн, размеры раскрытов которых равны $a = 0,44$ м и $b = 0,22$ м, т.е. в 2 раза больше сечения волноводов. Физико-химические свойства грунта были приняты на основании [2]. Математическая модель процесса составлена на основании уравнений [3, 4].

В результате математического моделирования определено:

- распределение удельной мощности по поверхности грунта при оптимальных размерах излучающей системы, состоящей из 8 рупорных антенн;
- температурное поле в грунте при его нагреве СВЧ-энергией до начала фазового перехода.

Основные результаты математического моделирования представлены на рис. 1, 2. Расчеты проведены при условии отсутствия в зоне воздействия СВЧ электромагнитного поля кабелей и коммуникаций. Вопрос о температурном распределении в грунте при наличии коммуникаций является чрезвычайно сложным и требует дальнейшего изучения.

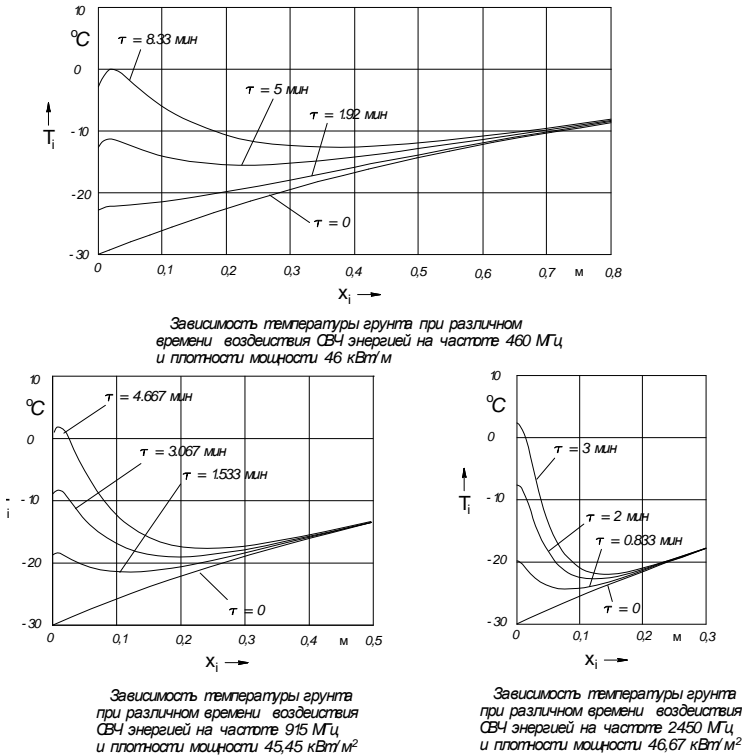


Рис. 1. Зависимости температуры грунта при различном времени воздействия СВЧ электромагнитной энергией на различных частотах

На основе полученных результатов моделирования проведена оптимизация процесса термообработки. По результатам оптимизации нагрева грунта получены данные, позволяющие в значительной мере упростить процесс создания эффективной СВЧ установки по дефростации грунта.

Получено, что в случае нагрева мерзлого грунта до температуры начала фазового перехода при суммарной мощности источников СВЧ-энергии 100 кВт и обрабатываемой поверхностью 2,85 м² производительность составит 8,8 м³/ч, при этом повышение температуры грунта на поверхности составляет около 30 °С. При среднем повышении температуры около 16,3 °С (на глубине проникновения 0,2 м) прочность мерзлого грунта снижается примерно в 3 раза, что позволяет производить его выемку. Удельные затраты электроэнергии при этом составят 11,32 кВт·ч/м³, что в 17 раз ниже чем при паровом нагреве, или в 8,5 раз – при электрообогреве.

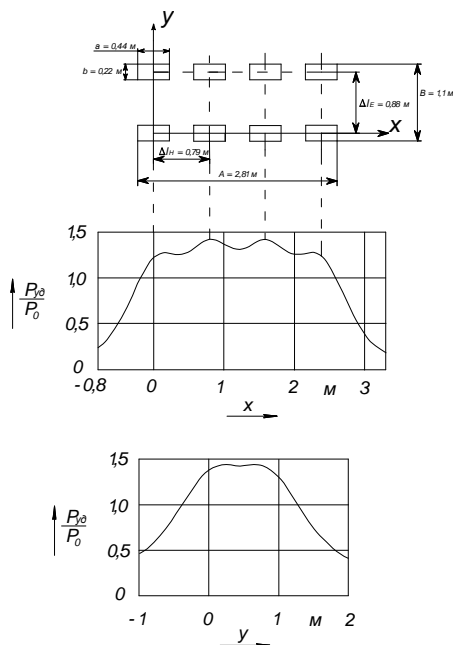


Рис. 2. Распределение относительной удельной СВЧ мощности по поверхности грунта при представлении расположении излучающих антенн

При нагреве мерзлого грунта до состояния таяния затраты электроэнергии увеличиваются примерно в 2 раза, а производительность установки соответственно уменьшится в 2 раза.

Таким образом, проведенные расчеты могут быть использованы при создании энергоэффективной установки с СВЧ энергоподводом для размораживания грунта. Экономический эффект от использования такой установки будет обуславливаться экономией сгораемого топлива при дефростации грунта, значительным сокращением времени на дефростацию, и связанной с этим экономией оплаты труда рабочих. Технологические преимущества таких установок перед альтернативными позволят решить проблему быстрого размораживания грунта при обеспечении максимальной экономической эффективности.

Библиографический список

1. **Мартюченко И.Г.** Методы снижения энергозатрат при разработке мерзлых и прочных грунтов / И.Г. Мартюченко; Саратов. гос. техн. ун-т; Саратов. гос. техн. ун-т (Саратов). – Саратов: СГТУ, 2004.

2. **Мазуров Г.П.** Физико-механические свойства мерзлых грунтов / Г.П. Мазуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, 1975.

3. **Архангельский Ю.С., Тригорный С.В.** СВЧ электротермические установки лучевого типа. – Саратов: СГТУ, 2000.

4. **Огуриов К.Н.** Разработка методов проектирования СВЧ камер лучевого типа для нагрева диэлектриков больших объемов и площадей // Электро- и теплотехнологические процессы и установки: межвуз. науч. сб. / СГТУ. – Саратов, 2003. – С. 47 – 54.

*Е.Г. Недайводин, курсант;
рук. А.В. Топоров, В.В. Киселев, Е.А. Топорова
(ИвИ ГПС МЧС России, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ПОЖАРНЫХ НАСОСОВ

В пожарных насосах возникает проблема уплотнения перекачиваемой среды. Выход из строя уплотнения перекачиваемой среды помимо снижения рабочих характеристик насоса может повлечь за собой выход из строя всего агрегата.

Таким образом, повышение эксплуатационных параметров уплотнительных устройств, их безотказность и долговечность – один из путей повышения надежности и долговечности пожарной техники.

В пожарной технике применяется целый ряд традиционных уплотнительных устройств. Однако, они не всегда обеспечивают необходимые рабочие характеристики.

Среди контактных уплотнений пожарных насосов широко распространены торцевые уплотнения, используемые в узлах и агрегатах работающих в исключительно тяжелых условиях. Торцевое уплотнение состоит в основном из трех элементов: двух колец (вращающегося и неподвижного) образующих плоскую пару трения и упругого элемента обеспечивающего контакт в паре трения. Кольца таких уплотнений могут изготавливаться из различных материалов. Обеспечение смазывания колец таких уплотнений может являться актуальной задачей [1].

Смазка трущихся частей торцевого уплотнения может осуществляться при помощи магнитной жидкости. В этом случае магнитная жидкость удерживается в области трения магнитными силами, возникающими при наложении магнитного поля. Для создания магнитного поля в элементы трения должна устанавливаться магнитная система, состоящая из постоянного магнита и магнитопроводов.

Выбрать наиболее рациональную конструкцию можно лишь на основании ее магнитного расчета.

Основными результатами расчета магнитного поля являются распределение магнитной индукции и картина магнитного поля. По этим параметрам возможно провести оценку магнитной системы уплотнения.

Критериями оценки в этом случае являются:

1. максимальная величина магнитной индукции в рабочей области уплотнения;
2. распределение магнитного поля в рабочей зоне уплотнения [2].

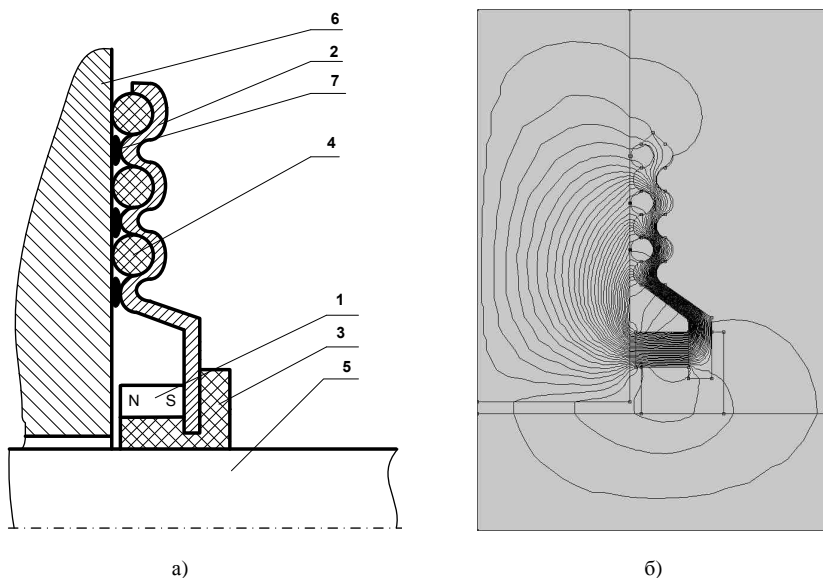


Рис. 1. Комбинированное торцовое магнитожидкостное уплотнение: а – схема уплотнения, б – картина магнитного поля

Применительно к данному виду уплотнений наиболее важным для достижения результата является именно удержание МЖ в области трения. Поэтому, основным при оценке работоспособности магнитной системы уплотнения является второй критерий. По опыту конструирования комбинированных магнитожидкостных уплотнений максимальная величина магнитной индукции в рабочей области, достаточная для удержания МЖ, должна составлять 0,05 – 0,1 Тл.

Для герметизации объемов с низким и средним давлением предложена новая конструкция комбинированного торцового магнитожидкост-

ного уплотнения представленная на рис 1, а [3]. Уплотнение состоит из кольцевого постоянного магнита 1, подвижного магнитопровода волнообразной формы 2, примыкающего к постоянному магниту 1. Кольцевой постоянный магнит 1 и подвижный магнитопровод волнообразной формы 2 закрепляются на втулке из эластомерного материала 3. Во впадины подвижного магнитопровода волнообразной формы 2 устанавливаются кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения 4. Втулка из эластомерного материала 3 устанавливается на валу уплотняемого устройства 5. В качестве неподвижного магнитопровода 6 используется деталь корпуса уплотняемого устройства. Магнитная жидкость 7 помещается в зазор между выступами подвижного магнитопровода волновой формы 2 и неподвижным магнитопроводом 6.

Работает уплотнение следующим образом. Магнитная жидкость удерживается между выступами подвижного магнитопровода волнообразной формы 2 и неподвижным магнитопроводом 6 магнитными силами, возникающими в результате протекания магнитного потока по контуру: кольцевой постоянный магнит 1 → подвижный магнитопровод волнообразной формы 2 → неподвижный магнитопровод 6. При возникновении перепада давлений магнитные силы, действующие на магнитную жидкость 7 компенсируют его действие, тем самым, обеспечивая герметичность уплотнения. Кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения 4 препятствуют изменению зазора между неподвижным магнитопроводом 6 и выступами подвижного магнитопровода 2 под действием магнитных сил, чем обеспечивается необходимая величина рабочего зазора уплотнения. В тоже время возникающие магнитные силы препятствуют перемещению подвижного магнитопровода волнообразной формы 2 в направлении от неподвижного магнитопровода 6. На валу уплотняемого устройства 5 комбинированное торцевое магнитожидкостное уплотнение закрепляется при помощи втулки из эластомерного материала 3.

Результаты магнитного расчета уплотнения представлены на рис. 1, б.

Библиографический список

1. **Уплотнения** и уплотнительная техника: справ. / А.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер и др.; под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – М.: Машиностроение, 1986.
2. **Топоров А.В.** Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений и исследование их трибологических характеристик: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.04. – Иваново, 2000.
3. **Патент** на полезную модель RU 88407 U1 от 10.11.2009. Комбинированное торцевое магнитожидкостное уплотнение / А.В Топоров., Е.А. Топорова, П.В. Пучков.

*П.С. Брыкалов, В.А. Гуцин, студенты; И.Ю. Долгих, инж.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ»

Работа посвящена модернизации и доработке лабораторной установки «Модель канальной печи» [3], позволяющей наглядно продемонстрировать студентам, изучающим курс «Электротехнологические установки и системы», принцип действия индукционной канальной печи [1, 2] и выявить основные закономерности нагрева металлов.

Разработанная установка представляет собой упрощенную модель индукционной канальной печи. Основным конструктивным узлом модели является однофазный трансформатор (рис. 1) с магнитопроводом из листовой электротехнической стали. Ядро трансформатора выполнено съемным для сборки и разборки, что необходимо для замены колец, моделирующих вторичную обмотку – канал. Первичная обмотка (индуктор) питается от лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), позволяющего регулировать входное напряжение в широких пределах. В условиях лаборатории плавка металла заменяется нагревом металлических колец, заменяющих канал с расплавленным металлом. Для экспериментов используются кольца из медной, алюминиевой и стальной проволоки с различным поперечным сечением [3].

Основная идея модернизации установки заключается в использовании в качестве вторичного витка водоохлаждаемой трубки. Вода под действием водяного насоса, проходя по вторичному витку (моделируемому каналу), омывает его, забирая при этом тепло, поступает в бачек, где температура измеряется с помощью термометра. Зная массу воды – теплоносителя, ее теплоемкость и изменение температуры несложно определить количество тепловой энергии, выделившейся в канале, определить потери энергии и КПД установки в целом. Для определения параметров достаточно, чтобы температура воды поднялась на 1 – 2 °С, причем при нагреве на большую температуру следует ожидать увеличение теплообмена с окружающей средой, что ухудшит чистоту эксперимента.

Доработанная установка позволяет проводить эксперименты с водоохлаждаемыми кольцами, изготовленными из медных, алюминиевых и стальных трубок различного диаметра. Подача воды в кольцо осуществляется из бачка с помощью электронасоса, включаемого в схему через

понижающий трансформатор и выпрямительный диодный мост. В качестве контрольно-измерительной аппаратуры удобно использовать комплексный измерительный прибор INSTEK GPM-8212, позволяющий измерять напряжение на индукторе, ток, мощность и коэффициент мощности во время работы установки. В целях безопасности питание стенда осуществляется от розетки, оборудованной дополнительным автоматическим выключателем.

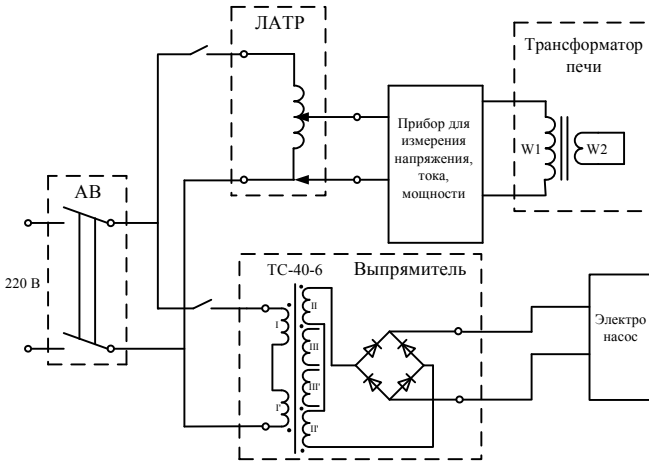


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема установки

По экспериментам можно получить следующие зависимости $I = f(U)$, $P = f(U)$ и $\cos\varphi = f(U)$. Кроме того, по результатам экспериментальных данных расчетным путем можно определить значения напряженности, индукции магнитного поля и магнитной проницаемости и построить соответствующие зависимости.

В опытах с водоохлаждаемыми кольцами определяется электрический КПД установки (1):

$$\eta = \frac{P_{пол}}{P_{измер}}, \quad (1)$$

где $P_{измер}$ – мощность, измеренная прибором в ходе эксперимента; $P_{пол}$ – полезная мощность, определяемая по формуле (2):

$$P_{пол} = \frac{Q_{пол}}{\Delta t}. \quad (2)$$

Здесь Δt – время нагрева; $Q_{пол}$ – количество выделяемой теплоты, определяемое в соответствии с (3):

$$Q_{пол} = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где m – масса воды, кг; c – теплоемкость воды; $\Delta T = T_2 - T_1$ – разность начальной и конечной температур воды, °С.

Библиографический список

1. **Иванова Л.И., Грובהва Л.С., Сокунов Б.А.** Индукционные канальные печи: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2002.
2. **Болотов А.В., Шепель Г.А.** Электротехнологические установки: учеб. для вузов по спец. «Электроснабжение пром. предприятий». – М.: Высш. шк., 1988.
3. **Долгих И.Ю.** Разработка и исследование физической модели канальной печи // Мат-лы региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – Т. 3. – С. 120 – 123.

*Д.А. Кукушкин, Н.П. Иванова, магистры;
рук. Р.Г. Нуруллин, к.т.н., доцент
(КГЭУ, г. Казань)*

ИМПУЛЬСНЫЙ ФОТОСТИМУЛЯТОР ДЛЯ ТРЕНИРОВКИ ЗРЕНИЯ

Свет является единственным раздражителем глаза, вызывающим зрительные ощущения, обеспечивающие зрительное восприятие мира. Свет как элемент жизненной среды человека представляет собой один из основных факторов важнейшей медико-биологической проблемы современности. Однако действие света на глаз не ограничено только аспектом видения и возникновением на сетчатке глаза изображений и формированием зрительных образов. Помимо основного процесса видения, свет вызывает и другие реакции рефлекторного и гуморального характера. Воздействуя через адекватный рецептор, коим является орган зрения, он вызывает импульсы, распространяющиеся по зрительному нерву до оптической области больших полушарий головного мозга и, в зависимости от интенсивности, возбуждает или угнетает центральную нервную систему, перестраивая физиологические и психические реакции, изменяя общий тонус организма и поддерживая деятельное состояние.

Видимый свет оказывает влияние также и на иммунные и аллергические реакции, на различные показатели обмена, изменяет уровень аскорбиновой кислоты в крови, в надпочечных железах и мозге. Он действует и на сердечно-сосудистую систему. В последнее время установлено также и гуморальное влияние нервного возбуждения, возникающее при световом раздражении глаза.

Целью данной работы является разработка прибора, предназначенного для тренировки рецепторного и нервно-мышечного аппарата глаз и для общего лечебно-профилактического воздействия на весь организм.

Прибор представляет собой плату, собранную на основе симметричного мультивибратора, с установленными на уровне глаз пациента световыми элементами [1]. Готовая схема платы доработана путем изменения различных параметров. Электрическая схема прибора приведена на рис. 1.

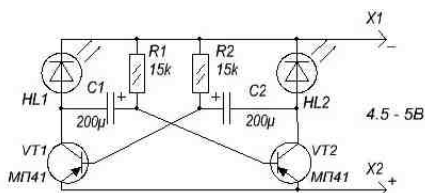


Рис. 1. Электрическая схема импульсного фотостимулятора: VT1, VT2 – транзисторы; C1, C2 – конденсаторы; R1, R2 – резисторы; HL1, HL2 – светодиоды

Частота симметричного мультивибратора зависит от номиналов конденсаторов C1, C2, а так же от резисторов R1, R2. Частота поочередного мигания светодиодов, соответственно, зависит от частоты мультивибратора, которую, в свою очередь, можно менять подбором конденсаторов C1, C2 и резисторов R1, R2. Транзисторы VT1, VT2, группы МП, и могут быть МП39, МП40, МП41, МП42 с любым буквенным индексом.

Воздействие осуществляется световыми импульсами красного, зеленого и голубого цвета. Источниками светового излучения являются цветные светодиоды.

Для общего воздействия подходит курс фотостимуляции с двумя светодиодами одного цвета. При этом пациент решает, какой цвет ему больше подходит в конкретной ситуации. Все одноцветные фотостимуляции способствуют эффективной психофизиологической релаксации и формированию готовности к активной работе. Вместе с тем, согласно экспериментальным исследованиям, зеленый цвет наиболее эффективен для этой цели. И только в случаях, когда индивидуальное восприятие голубого или красного цвета более приятно, следует использовать выбранный пациентом цвет. При светостимуляции красным цветом возможно увеличе-

ние артериального давления. Поэтому он противопоказан при артериальной гипертензии и при склонности к реакциям с увеличением давления [2].

Действие данного прибора проверялось опытным путем. Плату размещали перед лицом испытуемого так, чтобы светодиоды находились на уровне его глаз. Расстояние между пациентом и прибором составляло 30 см. Импульсная фотостимуляция проводилась длительностью 7 минут в условиях затемненной комнаты. Цвет и частота фотостимуляции выбирались исходя из предпочтений испытуемого. Режим так называемой «засветки» исключался. В данном опыте участвовали 20 испытуемых.

До начала фотостимуляции пациентам предлагалось прочитать один абзац из произведения художественной литературы объемом 200 слов. Скорость чтения засекалась с помощью секундомера. После прочтения предложенного абзаца на испытуемого воздействовали импульсными фотостимуляциями. После сеанса фотостимуляции пациенту давалось 10 минут отдыха, после чего предлагалось прочесть другой абзац литературного произведения того же автора, эквивалентный первому по количеству слов. Результаты также фиксировались с помощью секундомера.

После того, как данный опыт прошли все участники исследований, был проведен анализ, который показал, что после импульсной фотостимуляции скорость чтения у пациентов увеличилась в среднем на 7 – 9 % в сравнении с начальными данными.

Результаты испытаний показывают, что импульсная фотостимуляция является действенным методом на пути к улучшению зрительного восприятия, обладает расслабляющим и тонизирующим эффектом. Дальнейшие исследования в данной области светотехники являются перспективой для создания аппаратов, помогающих людям, имеющим проблемы со зрением.

Библиографический список

1. **Новости** электротехники: информационно-справочное издание. – 2005. – № 5.
2. **Влияние** различных частот фотостимуляции на динамику межполушарных взаимодействий / В.Ф. Коновалов, И.С. Серинов и др. // Физиология человека. – 1987.

*Д.М. Москвичева, А.Б. Медведев, К.Н. Кисилев, студенты;
рук. Л.И. Шеманаева, к.т.н., доцент
(КГТА, г.Ковров)*

УПРАВЛЕНИЕ ОСВЕЩЕНИЕМ ПОМЕЩЕНИЯ

Освещенность – величина светового потока, приходящегося на единицу поверхности. Освещение является одним из важнейших условий

нормальной жизнедеятельности. По результатам измерения освещенности можно сделать вывод о том, что продолжительность жизни человека на 60 – 70 % зависит от степени освещенности помещений, качества воздуха и воды. Так же система освещения является весомым потребителем электроэнергии в административных и производственных зданиях.

Разработанная авторами система одновременно со снижением потребления электроэнергии решает задачу поддержки комфортных условий освещенности, а также имеет возможность регулирования влажности и качества окружающего воздуха.

Объектом управления является источник света – лампа. Управляющим звеном – модуль Ke-USB24A. Модуль предназначен для сопряжения внешних цифровых и аналоговых устройств, датчиков и исполнительных механизмов с компьютером через шину USB.

Источники света в количестве 30 шт. состоят из набора ламп различного спектра света: белые, красные, желтые, синие, зеленые, ультрафиолетовые и инфракрасные. Количество ламп разного спектра определяется оптимальным сочетанием спектров для комфортного освещения, причем группы ламп могут работать в трех режимах – интенсивное свечение, свечение средней интенсивности и малой интенсивности.

Управление режимами происходит с помощью компьютерной программы, соединение компьютера и силовой части пока осуществляется гальванически, в дальнейшем планируется передавать через Bluetooth или ИК-порт.

Рассмотрим структурную схему устройства (рис. 1):

- блок 1 – управляющий модуль, на него поступает сигнал управления с компьютера;
- блок 2 – силовой модуль, счетчик принимает с модуля Ke-USB24A цифровой сигнал в виде двоичной последовательности цифр, преобразует в десятичный эквивалент, формирует пропорциональный сигнал и посылает его на силовой блок;
- блок 3 – линии ламп различного спектра, в данной установке используются красный, синий, желтый, зеленый и белый цвет. Предусматривается пять режимов интенсивности свечения: 100, 75, 50, 25 и 0 %. Следовательно, возможны 1024 комбинации, но проведя исследования освещенности мы сочли возможным оставить только 21. В результате возможны следующие сочетания, например:
 - группа красных ламп – сильной интенсивности;
 - группа синих ламп – средней интенсивности;
 - группа желтых ламп – слабой интенсивности;
 - группа зеленых ламп – слабой интенсивности;
 - группа белых ламп – слабой интенсивности;
 - группа красных ламп – слабой интенсивности;
 - группа белых ламп – средней интенсивности.

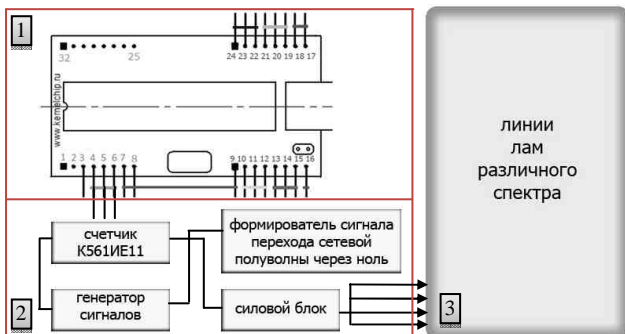


Рис. 1. Структурная схема управления нагрузкой

Компьютерная программа (рис. 2) передает на счетчик двоичную комбинацию, соответствующую интенсивности: «0 0 0» – 100 %, «0 1 0» – 75 %, «1 1 0» – 50 %, «1 0 1» – 25 %, «1 1 1» – 0 %. Причем имеется возможность как одновременно установить нужный уровень сигнала на линии, так и последовательно на каждой лампе в линии, что позволяет использовать программу для управления другими типами нагрузок, а силовой блок для другого исполнительного устройства.

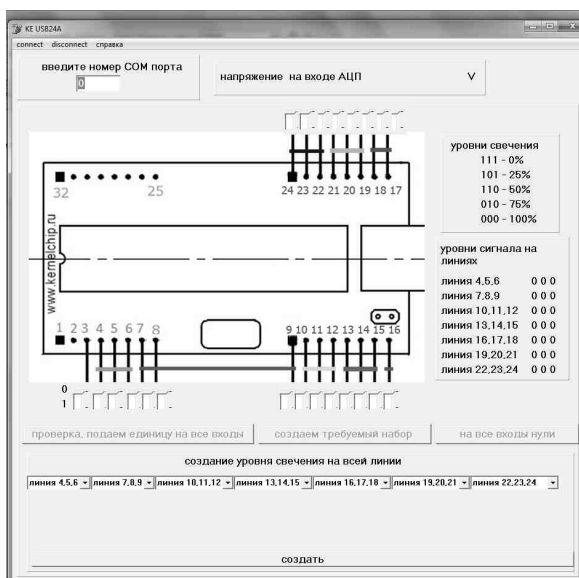


Рис 2. Внешний вид управляющей программы

В помещениях без окон устанавливается уровень света согласно ГОСТам.

*С.А. Корнев, магистрант;
рук. В.А. Шахнин, д.т.н., профессор
(ВлГУ имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир),
В.А. Осипов, к.т.н., зав. сектором энергетических исследований
(ЗАО НПО «Техкранэнерго», г. Владимир)*

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЭНЕРГОАУДИТЕ

Тепловизионный контроль применяется для оценки состояния электрооборудования широкого круга объектов энергетического обследования. На основе результатов тепловизионной диагностики разрабатывается перечень мероприятий по энергосбережению, реализация которых позволяет грамотно направлять инвестиции в энергохозяйство, снижать трудоемкость и объем плановых ремонтных работ, оперативно устранять аварийные дефекты. Эффективность этих мероприятий в большой степени определяется достоверностью тепловизионной диагностики, а ее повышение, безусловно, является актуальной задачей.

Для обеспечения высокой достоверности тепловизионной диагностики необходимо наличие трех основных составляющих:

- 1) методической базы, позволяющей надежно и достоверно оценивать состояние оборудования;
- 2) высококвалифицированных и аттестованных специалистов в области неразрушающего контроля;
- 3) парка инструментальных средств, имеющих необходимые характеристики для проведения диагностики.

На наш взгляд, в настоящее время наблюдается отставание методической базы от развития приборного парка тепловизоров. Например, методические рекомендации, содержащиеся в нормативных документах (РД 153-34.0-20.363-99 «Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ» и РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования»), не учитывают возросшие технические возможности современных тепловизоров. В частности, методически не проработаны особенности диагностики в режиме «авто», а также

вопросы настройки тепловизоров с учетом теплофизических свойств обследуемых объектов и с учетом нагрева от внешних источников и ряд других.

Автор работы предлагает метод, повышающий достоверность результатов тепловизионной диагностики на основе учета различий теплофизических свойств элементов конструкции обследуемого объекта. Метод отличается проведением многократной съемки объекта в различных режимах, каждый из которых является оптимальным для отдельных наиболее важных элементов конструкции, и в поэлементном анализе каждой из полученных термограмм теплового поля электрооборудования. В наиболее простом случае тепловизионная съемка и анализ термограмм проводятся для каждого элемента электрооборудования с учетом коэффициента излучения материала, из которого выполнен элемент. Количество съемок определяется сложностью обследуемого объекта.

Экспериментальные исследования показывают, что, например, для щита с рубильником и предохранителями, содержащим элементы из стали, алюминия, меди и неметаллических материалов, достаточно трех съемок. Обработка результатов прямых измерений температуры элементов с многократными ($n = 25$) наблюдениями показывает, что погрешность измерений, соответствующая доверительной вероятности 95 %, при диагностике с тремя съемками в различных режимах по предлагаемому методу снижается на 8 % по сравнению с результатами многократной съемки. Дальнейшее увеличение количества съемок нецелесообразно.

Библиографический список

1. РД 153-34.0-20.363-99. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ.
2. ПБ 03-440-02. Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля.
3. РД 34.45-51.300-97. Объемы и нормы испытаний электрооборудования.

*Е.А. Дятлова, Е.А. Сулютина, студенты;
рук. В.Н. Гречухин, к.т.н., доцент,
В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ТРАДИЦИОННЫЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ТТ И ТН ДЛЯ ПОДСТАНЦИЙ 110 – 750 КВ

Трансформаторы тока и напряжения высокого напряжения внутренней и наружной установки предназначены для измерения тока и напря-

жения, питания схем релейной защиты, изолирования измерительных приборов, реле, обслуживающего персонала от высокого напряжения и применяются в ОРУ и ГРУ сетей переменного и постоянного тока, а также в устройствах защиты и регулирования, в токопроводах генераторных распределительных устройств.

Более ста лет в электроэнергетике и промышленности при высоковольтных измерениях переменных токов используют электромагнитные измерительные трансформаторы тока и напряжения, но это уже устаревшие технологии.

Их недостатками является снижение эксплуатационных характеристик (безопасность, эксплуатационные расходы) и ухудшение метрологических характеристик измерительных комплексов (повышенный тангенс диэлектрических потерь и ухудшенные переходные характеристики емкостных ТН) [2].

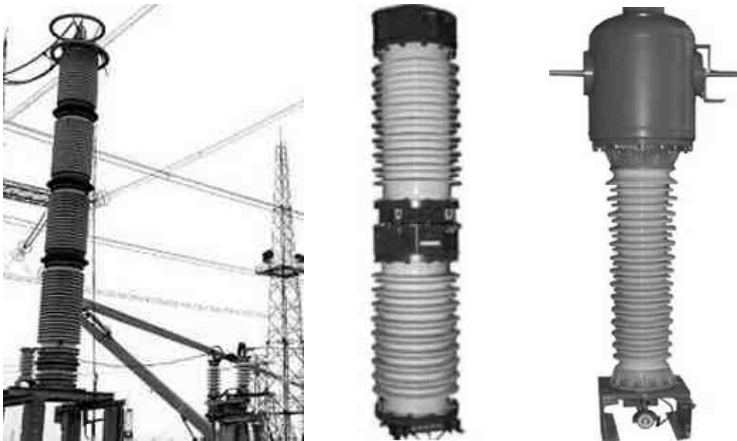


Рис. 1. Традиционные ТТ и ТН

На смену традиционным ТТ и ТН приходят оптические трансформаторы и преобразователи тока. Выделяют следующие преимущества ОТТ/ОПТ:

- возможность масштабного преобразования и измерения переменного, постоянного и импульсного тока различных уровней напряжений;
- оптико-электронное малоинерционное преобразование световых сигналов с отсутствием явлений гистерезиса, магнитного насыщения и остаточного намагничивания;
- большой динамический диапазон (0,1 – 200 % $I_{ном}$) и высокая точность (0,1 – 0,2 %) для измерений и защиты токовых цепей;

- широкая полоса пропускания сигналов (не менее 6 кГц), позволяющая производить полный анализ количества и качества электроэнергии в части гармоник и переходных процессов;
- полная эколого-, пожаро-, взрыво- и электробезопасность за счет отсутствия вредных веществ и электропроводящих материалов в ВОДТ);
- высокая помехоустойчивость к электромагнитным помехам;
- долговечность, долговременная стабильность и высокая повторяемость метрологических параметров изделий;
- низкая восприимчивость к вибрациям и изменениям температуры;
- малые весогабаритные параметры, упрощающие и облегчающие монтаж [1].

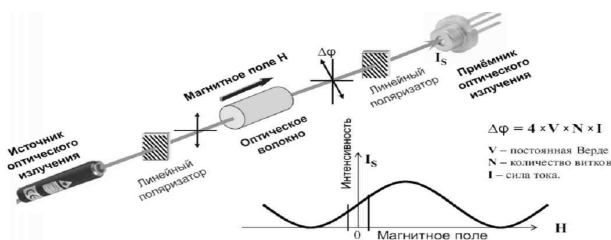


Рис. 2. Эффект Фарадея в ОТТ

Но, несмотря на свои достоинства, ОТТ/ОПТ не могут полностью заменить традиционные ТТ во всех областях их применения. Причиной этого является несовершенство вышеизложенных характеристик.



Рис. 3. Общий вид устройства ОТТ

В настоящее время идет активное внедрение микропроцессорных устройств РЗ и А, что приводит к необходимости разработки и внедрению цифровых ТТ и ТН [3]. Их достоинства и преимущества очевидны и заключаются в передаче информации о токе по волокну не подверженному влиянию электромагнитных наводок, принципиально устраняются погрешности и зависимости от величины нагрузки присущие традицион-

ным ТТ и ТН, в принимающих микропроцессорных устройствах исключаются преобразующие трансформаторы и АЦП.

Сочетание цифрового ТТ с традиционным ТН позволяет объединить положительные качества и компенсировать недостатки решая вопросы питания. В качестве ТН предлагается использовать ТН с разомкнутым магнитопроводом, который, благодаря своей конструкции является антирезонансным, однако имеет низкую нагрузочную способность по сравнению ТН с замкнутыми сердечниками. Потребляемая мощность электропитанием ЦТН не превышает 10 Вт, что практически не повлияет на точностные характеристики трансформатора.

Библиографический список

1. **Гуревич В.** Оптоэлектронные трансформаторы: панацея или частное решение частных проблем? // Вести в электроэнергетике. – 2010.
2. **Новости** электроники. – 2009. – № 5 (59). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/59/05.php>. – Загл. с экрана.
3. **Гречухин В.Н.** Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110-750 кВ станций и подстанций энергосистем // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 35 – 42.

С.С. Новикова, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ МАГНИТОПРОВОДОВ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ГЕРМЕТИЗАТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ

Конфигурация магнитопровода магнитожидкостного герметизатора (МЖГ) оказывает значительное влияние на распределение магнитных потоков. Однако не всегда наименьшее значение потока рассеяния МЖГ позволяет решить поставленную техническую задачу. Часто возникает необходимость полностью исключить возможный контакт постоянного магнита с герметизируемой средой.

Традиционная конструкция МЖГ не позволяет добиться данного технического результата. Кроме того, в данной конструкции МЖГ отсутствует возможность замены постоянных магнитов и изменения их количества без ее разборки. В модернизированной конструкции МЖГ [1] (рис. 1) такая возможность предусмотрена.

МЖГ состоит из магнитного узла, включающего в себя постоянный магнит 1 и две полюсные приставки, концентрически охватывающие вал. Одна из полюсных приставок является внешней и выполнена составной, причем одна из ее частей 2 примыкает к торцевой поверхности постоянного магнита 1, а другая часть 3, образует рабочий зазор δ_1 с вращающимся валом 4. Вторая полюсная приставка 5 является внутренней, которая примыкает к торцевой поверхности постоянного магнита 1 и образует рабочий зазор δ_2 с вращающимся валом. Между полюсными приставками находится немагнитопроводная втулка 6. Рабочие зазоры заполнены магнитной жидкостью 7.

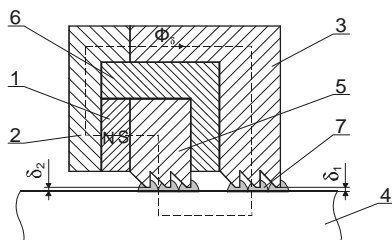


Рис. 1. Модернизированная конструкция МЖГ

Магнитожидкостное уплотнение работает следующим образом: рабочий магнитный поток Φ_δ замыкается по пути: постоянный магнит 1, части внешней составной полюсной приставки 2 и 3, рабочий зазор δ_1 , вал 4, рабочий зазор δ_2 , внутренняя полюсная приставка 5, постоянный магнит 1 и образует замкнутую магнитную цепь. Магнитная жидкость 5 взаимодействует с полем постоянного магнита и удерживается в рабочих зазорах δ_1 и δ_2 пондеромоторной силой, образуя препятствие для прохождения герметизируемой среды.

Особенность предлагаемой конструкции МЖГ состоит в том, что одна из полюсных приставок является внешней и выполнена составной, причем одна из ее частей 2, которая расположена с внешней стороны герметизируемой среды и примыкает к торцевой поверхности постоянного магнита 1, имеет возможность быстрого монтажа и демонтажа. Это позволяет регулировать эксплуатационные характеристики МЖГ за счет изменения параметров магнитного поля в рабочих зазорах δ_1 и δ_2 при выборе магнитов с разными энергетическими характеристиками и подбирать наиболее рациональный эксплуатационный режим.

Кроме этого, такая конструкция МЖГ позволяет полностью исключить контакт постоянных магнитов с герметизируемой средой, что особенно важно при герметизации агрессивных сред.

Представляет интерес оценить обе конструкции МЖГ с точки зрения пепрепада давлений при использовании магнитов одинаковых марок и размеров.

В качестве магнитов рассматривались редкоземельные сплавы марки КС 37. При этом, в конструкциях МЖГ изменялись: длина магнитов в направлении намагничивания в диапазоне от 1 до 7 мм, при этом шаг зубца b составлял 3 мм или 4 мм. Кроме этого, все расчеты были проведены для двух материалов магнитопровода: Стали 20 и Стали 20Х13. Величина рабочего зазора δ для всех рассматриваемых случаев составляла 0,15 мм. Зубец был выполнен в форме прямоугольной трапеции с углом при основании $\alpha = 45^\circ$ и величиной площадки $t = 0,4$ мм. Обе стали отличаются по индукции магнитного насыщения и по коррозионной стойкости. Расчет магнитопровода обеих конструкций проведен с использованием метода конечных элементов, который реализован в программном комплексе ELCUT. Триангуляция расчетной области проводилась с учетом граничных условий Дирихле-Неймана.

Конструкция МЖГ (рис. 1) имеет значительное поле рассеяния. Поэтому необходимо сравнить обе конструктивные схемы с точки зрения параметров магнитного поля в рабочем зазоре герметизатора.

На рис. 2 и 3 приведены графики изменения величины максимальной магнитной индукции под зубцом в зависимости от длины магнита при использовании в качестве магнитопровода Сталь 20. Аналогичный анализ проводился для магнитопровода, изготовленного из стали марки: Сталь 20Х13.

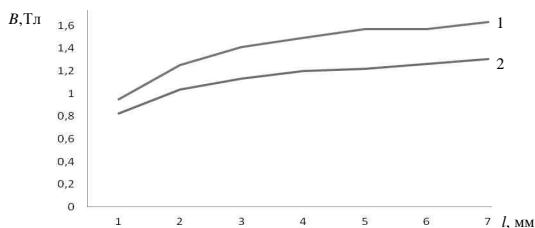


Рис. 2. Зависимости максимальной магнитной индукции от длины магнита при шаге зубца 3 мм: 1 – стандартная конструкция; 2 – конструкция с закрытым магнитопроводом

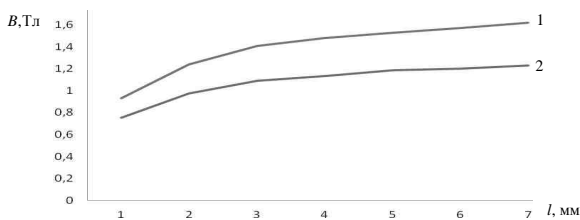


Рис. 3. Зависимости максимальной магнитной индукции от длины магнита при шаге зубца 4 мм: 1 – стандартная конструкция; 2 – конструкция с закрытым магнитопроводом

Как видно из полученных зависимостей при использовании модернизированной конструкции величина максимальной магнитной индукции под зубцом снижается на 17 – 24 % по сравнению со стандартной конструкцией для Стали 20, причем больший процент соответствует большей длине постоянного магнита. Для Стали 20Х13 наблюдается такая же зависимость, но величина магнитной индукции под зубцом снижается на 23 – 20 % при использовании модернизированной конструкции.

При уменьшении длины постоянного магнита от 7 до 4 мм для каждой конструкции герметизатора наблюдается незначительное снижение величины максимальной индукции под зубцом, которая составляет 9 – 10 % для стандартной и 6 – 8 % для модернизированной конструкции.

При уменьшении длины постоянного магнита от 4 до 1 мм снижение максимальной индукции под зубцом составляет 40 – 60 % для стандартной 30 – 45 %.

Библиографический список

1. Патент на полезную модель, Российская Федерация N 113325, МКИ F16J 15/54. Магнитожидкостное уплотнение / М.С. Сайкин, Д.Ю. Морозова, О.Е. Федорова. Приоритет от 12.10.2011, опубл. 10.02.2012. Бюл. N 4.

О.В. Демиденко, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г Иваново)

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЙ АГНИТОЖИДКОСТНЫХ ГЕРМЕТИЗАТОРОВ

При эксплуатации магнитожидкостных герметизаторов (МЖУ) особенно на большие диаметры уплотнительных валов и при сборке конструкций магнитопровода важным является задача исследования влияния технологических зазоров, необходимых при сборке конструкций на величину перепада индукции под зубцом МЖУ.

Одним из технологических зазоров является зазор между постоянным магнитом и полюсными приставками. Любой зазор является дополнительным магнитным сопротивлением для прохождения магнитного потока по замкнутой магнитной цепи.

Объектом исследования является МЖУ, конструкция которого представлена на рис. 1.

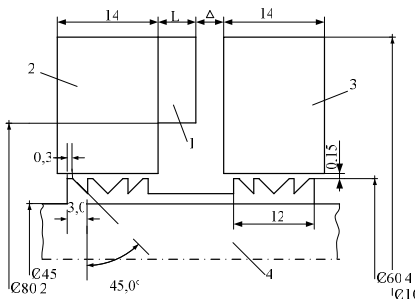


Рис. 1. МЖУ

Он состоит из постоянного магнита (1), который, как правило, является наборным состоящих из отдельных пластин или дисков. К торцевым поверхностям магнита примыкают полюсные приставки (2) и (3) концентрически охватывающие вал (4).

Между полюсными приставки и валом имеется рабочий зазор δ , который заполнен магнитной жидкостью, она удерживается в этом зазоре пондеромоторной силой.

Исследования проводились в интегрированной среде ELCUT. Исходными данными были диаметр вала 45 мм., величина рабочего зазора 0,15 мм, шаг зуба 3 мм, величина площадки при основании 0,3 мм. Зуб выполнен в виде прямоугольной трапеции с углом при основании 45° . В качестве источника магнитного поля использовали самарий-кобальтовый магнит марки КС-37 второй группы. В качестве материала магнитопровода выбрана конструкционная сталь марки Сталь 10 с индукцией магнитного насыщения 2,1 Тл в поле 50000 А/м.

В ходе численных исследований изменялась длина магнита от 1 до 10 мм с шагом 1 мм, а также расстояние Δ между магнитом и внутренней торцевой поверхности полюсной приставки от 0 до 5 мм. Результаты расчетов представлены на рис. 2, а, б – зависимости величины перепада индукции от величины технологического зазора.

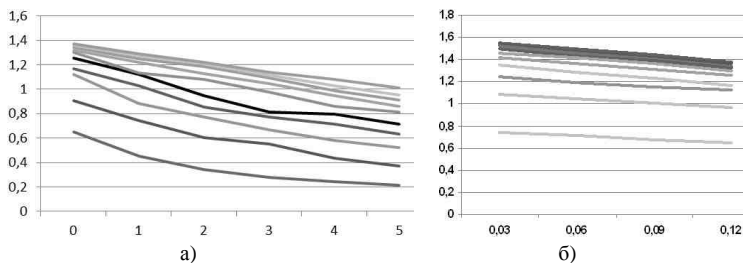


Рис. 2. Зависимости величины перепада индукции от величины технологического зазора

Библиографический список

1. **Фертман В.Е.** Магнитные жидкости: справ. пособие. – М.: Выс. шк., 1988.
2. **Пятин Ю.М.** Постоянные магниты: справ. – М.: Энергия, 1980.
3. **Константинов О.Я.** Магнитная технологическая оснастка. – Л.: Машиностроение, 1974.
4. **Орлов Д.В., Подгорков В.В.** Магнитные жидкости в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1993.
5. **Интегрированная** среда ELCUT 5.1 Professional.

С. Баженов, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО
ГЕРМЕТИЗАТОРА КАМЕРЫ ВАКУУМНОЙ СВАРКИ**

Слабым местом любой камеры вакуумной сварки является герметичность вводов. Особенно актуально эта задача стоит при герметизации в условиях возвратно-поступательного движения (ВПД). Наиболее перспективным является применение магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ), способных обеспечить высокую герметичность ($10^{-5} : 10^{-7}$ мм рт. ст.).

Исследования [1, 2] показали, что «классическая» конструкция магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ) не является работоспособной в условиях возвратно-поступательного движения (ВПД). При ВПД штока происходит искривление формы магнитожидкостного уплотнителя, находящегося под зубцом полюса (рис. 1), под действием сдвигающей силы, обусловленной адгезией уплотнителя к штоку и внутренним вязким трением. При движении штока в направлении действия перепада давлений уплотнитель перемещается в область более слабого поля и удерживаемый им перепад давлений уменьшается, что может привести к возникновению газового канала и пробоя уплотнителя.

Анализ процессов, протекающих в МЖГ при ВПД, позволяет наметить следующие пути создания работоспособных конструкций МЖГ: снижение адгезионного взаимодействия между МЖ и штоком; повышение устойчивости и эффективности залечивания магнитожидкостного уплотнителя; обеспечение работоспособности многозубцовой системы МЖГ.

В настоящей работе приведены результаты численных исследований распределения индукции магнитного поля под зубцами МЖГ для ВПД.

Предлагается комбинированное уплотнение с использованием газодинамического сопротивления в качестве средств обеспечения работоспособности многозубцовой системы.

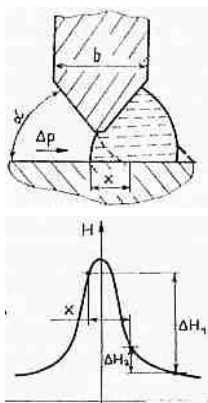


Рис. 1. Положение МЖ уплотнителя и распределение напряженности магнитного поля под симметричным зубцом

Конструктивно это осуществляется установкой шайб между зубцами, уменьшая тем самым зазор между полюсом и штоком и увеличивая ширину зубца полюса. Для повышения герметичности целесообразно использовать сочетание шайб из эластичного материала и несимметричных трапецевидальных зубцов. Свободная поверхность уплотнителя со стороны шайбы сведена к минимуму. Стабилизация положения уплотнителя таким образом снижает влияние деформации на его герметичность. МЖ за счет сил адгезии прилипает к шайбе, поэтому у уплотнителя со стороны шайбы нет свободной поверхности и его положение под зубцом будет более устойчивым, что уменьшает вероятность микропробоев.

При проектировании МЖГ особое внимание уделялось правильному выбору размеров рабочей зоны, обеспечивающих его работоспособность для заданного режима работы и минимальные габариты. (рис. 2).

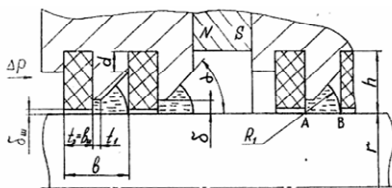


Рис. 2. Параметры рабочей зоны МЖГ с газодинамическими сопротивлениями

В работе проводилось моделирование картины распределения индукции магнитного поля в рабочих зазорах вакуумного герметизатора на заданный диаметр ($D = 19,1$ мм) уплотняемых валов.

Зубец полюсной приставки трапеции с углом при основании $\alpha = 45^\circ$ и величиной площадки $t = 0,04$ мм. В ходе выполнения расчетов изменялась величина рабочего зазора. Она составляла $\delta = 0,1; 0,15; 0,2$ мм.

В качестве постоянных магнитов был выбран сплав на основе соединения неодим-железо-бор с величинами остаточной индукции $B_r = 0,77$ Тл и коэрцитивной силы $H_c = 560$ кА/м. Материал магнитопровода – сталь 10 с индукцией насыщения $B = 2,1$ Тл в поле с напряженностью $H_c = 50$ кА/м.

Для моделирования магнитного поля в рабочем зазоре МЖГ использовался программный комплекс «ELCUT». В автоматическом режиме производилась триангуляция расчетной области герметизатора с учетом граничных условий Дирихле-Неймана.

Для каждой геометрии рабочего зазора получена картина распределения магнитной индукции в нем, что позволяет определить величину критического перепада давлений МЖГ. Один из полученных графиков приведен на рис. 3

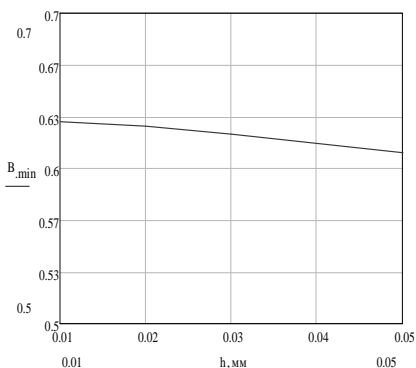


Рис. 3. График изменения максимальной и минимальной магнитных индукций по высоте рабочего зазора при $\delta = 0,1$ мм

С ростом величины зазора происходит снижение величины магнитных индукций, причем величина максимальной магнитной индукции снижается значительно сильнее, чем минимальной. Это приводит к снижению величины критического перепада давлений МЖГ.

На основании полученных результатов расчетов можно прогнозировать величину критического перепада давлений для МНЖГ с заданным диаметром и величинами рабочего зазора $\delta = 0,1 - 0,2$ мм.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- необходимая величина максимальной магнитной индукции у поверхности уплотняемого вала при заданных условиях достигается при значениях рабочего зазора $\delta \leq 0,1$ мм;
- полученные значения минимальной индукции завышены, что не позволяет в полной степени получить необходимый перепад давлений для МЖГ. При дальнейшей разработке будет увеличена величина углубления шайб относительно полюсов герметизатора, что позволит увеличить магнитное сопротивление, тем самым получить необходимые значения минимальной индукции.

Библиографический список

1. Дубравин Н.А., Лысенков С.Г., Михалев Ю.О., Шулаков А.В. Исследование магнитоожидкостных уплотнений вводов возвратно-поступательного движения // Одиннадцатое Рижское совещание по магнитной гидродинамике. – Т. 3. Магнитные жидкости. – Саласпилс: Ин-т физики А ЛатвССР, 1984. – С. 159 – 162.
2. Евсин С.И., Страдомский Ю.И., Харьковский В.Б. Исследование классического магнитоожидкостного герметизатора при возвратно-поступательном движении штока // Магнитная гидродинамика. – 1986. – № 3. – С. 37 – 42.
3. Евсин С.И., Соколов Н.А., Страдомский Ю.И., Харьковский В.Б., Исследование процессов в магнитоожидкостных герметизаторах вводов возвратно-поступательного движения // Магнитные жидкости в ИГЭУ: Тр. ИГЭУ / Под ред. Ю.А. Щелькалова. – Иван. гос. энерг. ун-т, 2004.

А.В. Алейников, студ.;
рук. В.А. Мартынов, д.т.н., профессор,
А.Н. Голубев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

К РАСЧЕТУ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СИНХРОННЫХ МНОГОФАЗНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В основе анализа динамических процессов любой электрической машины лежат дифференциальные уравнения электрических состояний ветвей и электромагнитного момента, а так же уравнения движения вращающихся частей:

$$\frac{d[\psi]}{dt} = [U] - [R][i], \quad \frac{d\alpha}{dt} = \Omega, \quad \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(M_{\ominus} - M_C), \quad (1)$$

где $[\psi]$ – матрица-столбец потокосцеплений всех фаз; $[U]$ – матрица-столбец фазных напряжений ветвей; $[R]$ – диагональная матрица активных сопротивлений фаз; $[i]$ – матрица-столбец токов фаз; Ω – угловая скорость ротора; M_C – момент сопротивления; $M_{\mathcal{E}}$ – электромагнитный момент; α – угол поворота ротора относительно статора.

Эта система нелинейных дифференциальных уравнений исчерпывающим образом описывает переходные электромагнитные процессы в любой электрической машине, однако ее решение невозможно без установления уравнений связи между точками ветвей и их потокосцеплениями, что можно сделать только на основе анализа магнитного поля в активной зоне машины

Как правило, ротора вентильных двигателей выполняются из высокоэрривтивных постоянных магнитов, относительная проницаемость которых близка к единице. В качестве примера представлены конструкции роторов синхронных вентильных двигателей.

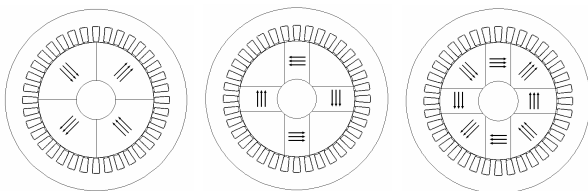


Рис. 1. Конструкции роторов синхронных вентильных двигателей

Полные потокосцепление ветвей всех фаз машины можно представить в виде двух слагаемых:

$$[\psi] = [\psi_o] + [L][i], \quad (2)$$

где $[\psi_o]$ – потокосцепление фаз, обусловленных постоянными магнитами ротора; $[L]$ – матрица само- и взаимоиндуктивностей ветвей обмотки статора.

Особенностью рассматриваемых машин является то, что насыщение магнитной цепи статора обусловлено, главным образом, постоянными магнитами ротора, а элементы матрицы $[L]$ являются линейными и не зависят от угла поворота ротора α . В этом случае $\frac{d[\psi]}{dt}$ может представлено в виде:

$$\frac{d[\psi]}{dt} = \Omega \frac{d[\psi_o]}{d\alpha} + [L] \frac{d[i]}{dt}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в первое уравнение (1), получим уравнение переменных состояния относительно неизвестных токов ветвей.

$$\frac{d[i]}{dt} = [L]^{-1} \left\{ [U] - [R][i] - \Omega \frac{d[\psi_o(\alpha)]}{d\alpha} \right\}. \quad (4)$$

Для решения (4) необходимо знать зависимость $[\psi_o(\alpha)]$. Эта зависимость определяется на основе расчета поля в активной зоне машины методом конечных элементов при различных положениях ротора относительно статора. В качестве примера на рис. 2 приведены картины магнитного поля в активной зоне вентильных двигателей с роторами различных конструкций.

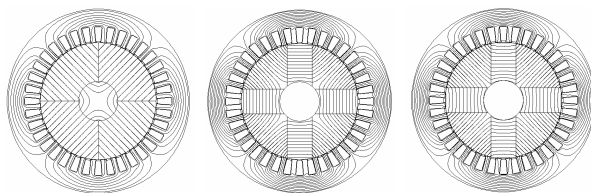


Рис. 2. Распределение магнитного поля в двигателях

На рис. 3 представлены кривые $[\psi_o(\alpha)]$ для различных систем ротора различных конструкций на одном полупериоде изменения. Эти кривые аппроксимируются сплайнами, что позволяет легко определить зависимость

мосьть $\frac{d[\psi_o(\alpha)]}{d\alpha}$ при известном угле α .

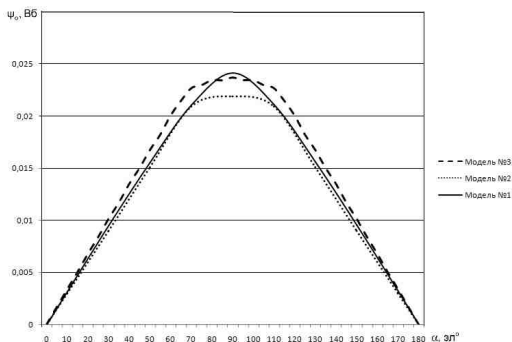


Рис. 3. Зависимость потокоцепления катушки от угла поворота ротора

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет с небольшими затратами времени ЭВМ моделировать динамические процессы синхронных вентильных двигателей с постоянными магнитами непосредственно в фазных координатах с учетом зубчатости статора, дискретной структуры многофазных обмоток и насыщения магнитной цепи.

*Е.А. Щукин, Р.А. Крайнов, В.И. Левин, студенты;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАНСФОРМАТОРА В ПРОГРАММЕ COMSOL MULTIPHYSICS ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Трансформатор (от лат. transformo – преобразовывать) – статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно-связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока (ГОСТ Р52002-2003).

Методы расчета трансформатора в статическом режиме известны, представлены широким спектром в учебно-научной литературе, нормативно-технической документации. Однако, исследование работы трансформатора в динамике в зависимости от поставленных задач, очень часто требует создания специальных математических моделей.

Развитие компьютерной техники и программ моделирования открывает широкие возможности для создания моделей трансформаторов учитывающих все большее и большее число физических эффектов.

В данной работе представлена модель трансформатора, выполненная с применением программы конечно-элементного моделирования Comsol Multiphysics.

Модель, составленная в программе Comsol, осуществляет расчет магнитного поля посредством решения уравнения относительно векторного магнитного потенциала, по распределению которого могут быть определены собственные и взаимные индуктивности.

Однако мы расширили создать более сложную модель, объединив цепную и полевою задачу, решив их параллельно. Такое объединение позволило создать модель, учитывающую не только магнитные связи между витками обмоток трансформатора, но и электрические связи, такие как

межвитковые емкости. Такого рода задачи актуальны при исследовании вопросов электромагнитной совместимости, техники высоких напряжений, а также исследования метрологии измерительных трансформаторов тока и напряжения в широком спектре частот.

Индуктивные и емкостные связи между витками катушек трансформатора представлены на рис. 1. При создании модели обмотка условно делилась на сегменты, в первую очередь по слоям, а слои также разбивались на части и предварительно определялись значения емкостей. Величина емкостей в первую очередь зависит от толщины межвитковой изоляции и ширины выбранного сегмента. Значение емкостей можно выполнить вручную с использованием комплекса MathCAD. Данные емкости будут учитываться в схеме замещения в виде эквивалентных конденсаторов.

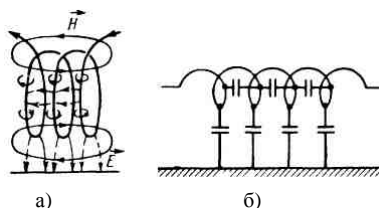


Рис. 1. а – распределение полей; б – эквивалентная схема реальной обмотки

Созданная конечно-элементная модель позволяет рассчитывать собственные и взаимные индуктивности отдельных частей – сегментов обмоток, а затем использовать расчетные значения для составления и решения системы уравнений.

С помощью подпрограммы SPICE Circuit Editor пакета COMSOL была описана схема замещения трансформатора (рис. 2), содержащая предварительно рассчитанные значения емкостей конденсаторов, активные сопротивления обмоток – резисторы, а также индуктивности. Следует отметить, что индуктивности представляют собой эквивалентные источники ЭДС собственной и взаимной электромагнитной индукции, величины значений которых представляют собой результаты расчета электромагнитного поля.

На первой стадии исследования первичная обмотка в модели была разбита на 3 части (сегмента) и вторичная на 9 частей (сегментов) (рис. 2).

На данном этапе исследовательской работы были приняты следующие допущения и упрощения:

- 1) конденсаторы, образованные между намотками катушки считались плоскими;
- 2) каждый слой обмотки разбивался на 3 части, таким образом, первичная обмотка трансформатора составляла 3 сегмента, а вторичная – 9;

3) относительная магнитная проницаемость магнитопровода принята равной const (для возможности проверки правильности модели используя аналитические методы расчета).

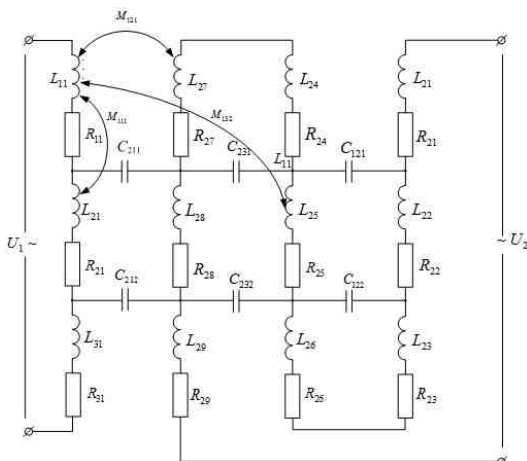


Рис. 2. Структурная схема для расчета индуктивностей

Результатами расчета с использованием разработанной модели являются распределение электромагнитного поля трансформатора, а также токи и напряжения всех элементов схемы замещения в виде временных функциональных зависимостей. На рис. 3 представлены зависимости входного и выходного напряжений. На рис. 4 представлено распределение электрического поля по Z компоненте.

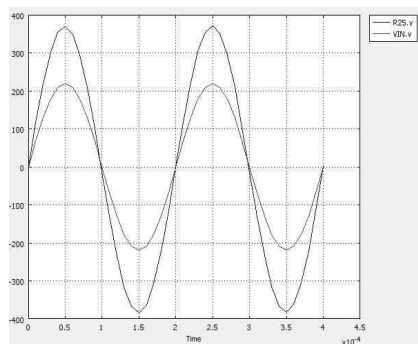


Рис. 3. Входной и выходной сигналы трансформатора

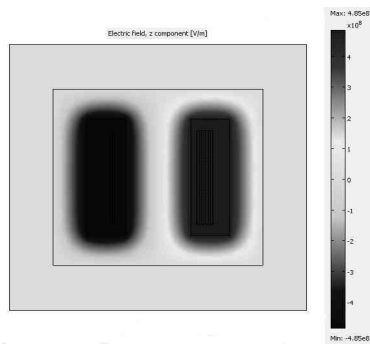


Рис. 4. Распределение электрического поля в пространстве по Z компоненте

Библиографический список

1. **Стороженко Ю.И.** Научный вестник Норильского индустриального института: научно-практический журнал. – 2008. – № 3.
2. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. шк., 1996.

С.Ю. Токарев, асп.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

**ПРИМЕНЕНИЕ ОБРАТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАПЛАСА
ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В МНОГОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ**

Поверхностный эффект в земле и проводах является функцией частоты [3, стр. 558]. По этой причине параметры многопроводной линии определяются в частотной области. Теоретически, это позволяет ожидать получения наиболее точных результатов [4, стр. 116].

Само решение системы волновых уравнений в частотной области формируется с помощью введения в рассмотрение модальной системы координат [1].

Расчет переходных волновых процессов в многопроводной системе должен быть произведен во временной области с помощью теоремы о свертке. Для этого предварительно должна быть получена импульсная характеристика $h(t)$ этой системы.

По определению, эту характеристику получают из ее передаточной характеристики $H(s)$ с помощью обратного преобразования Лапласа.

Однако особенностью построения решения в нашем случае является отсутствие непосредственного аналитического представления передаточной характеристики в виде изображения по Лапласу. Все, что мы имеем, – лишь комплексная частотная характеристика $H(j\omega)$, полученная численными методами (т.е. в виде графика или таблицы).

Действительно, решение поставленной задачи аналитически имеет весьма высокую сложность, даже если вообще практически возможно [2, стр. 246; 4, стр. 117]. По этой причине ставка делается на численные методы аппроксимации [2, стр. 243].

Таким образом, ставится новая задача о параметрической идентификации передаточной функции в s -области по известной $H(j\omega)$ в виде отношения двух полиномов [6, п. В.1].

Отметим, что параметры многопроводной системы определяются с использованием бесселевых (трансцендентных) функций. Этот факт определяет наличие у $H(s)$ бесконечно большого числа полюсов [5, стр. 518]. Выбор оптимального порядка $H(s)$ определяется итеративно [3, п. А.5.1.8].

В любом случае, степень числителя такой дроби выбирается меньше степени знаменателя. Это позволяет избежать появления слагаемого, соответствующему, (во временной области) $\delta(t)$. Дельта-функция, математически, представляет мгновенный скачок, что, физически, является прямым нарушением законов коммутации.

Далее эту дробно-рациональную функцию разлагают на простейшие дроби [5, п. 9.2.5.4]. Оригинал (функция времени) для каждой такой дроби находится аналитически. Для действительных полюсов им будет являться экспоненциальная функция, а для пары комплексно-сопряженных – синусоида с экспоненциально-меняющейся амплитудой. Сумма оригиналов таких дробей даст искомую функцию $h(t)$.

В последние десятилетия был произведен достаточно большой объем исследований по аппроксимационному получению $H(s)$ для использования в программных комплексах типа «EMTP». Наиболее значительных (для практического использования) успехов добились Таку Нода, Хосе Марти, Бьерн Густавсен и Адам Сэмлен.

Отметим, что обозначенный выше путь получения $h(t)$ не является единственно возможным. Существует еще решение с помощью применения численного обратного преобразования Лапласа, которое может быть сведено к обратному быстрому преобразованию Фурье [4, п. 2.4]. Однако при этом возникает проблема наложения спектров [4, п. 2.2] и появляется эффект Гиббса [4, п. 2.1].

Библиографический список

1. **Токарев С.Ю., Лебедев В.Д.** Уравнения многопроводной линии: практический подход // Энергия-2011: материалы шестой региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3 томах. Т. 3. – Иваново: ИГЭУ, 28 апреля 2011. – С. 134 – 136.
2. **Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П.** Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973.
3. **Martínez-Velasco Juan A. (ed.)**. Power System Transients: Parameter Determination. – CRC Press, 2009.
4. **Gómez P., Uribe F.A.** The numerical Laplace transform: An accurate technique for analyzing electromagnetic transients on power system devices // Electrical Power and Energy Systems. – 31(2009). – 116 – 123.
5. **Paul C.R.** Analysis of Multiconductor Transmission Lines, 2nd Edition. – John Wiley & Sons, 2008.
6. **Watson N., Arrillaga J.** Power systems electromagnetic transients simulation. – The Institution of Electrical Engineers, London, 2003.

К.Е. Корнилов, студ.;
рук. А.В. Макаров, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Феррорезонансные явления возникают в электрических сетях при взаимодействии нелинейных индуктивностей магнитопроводов трансформаторов с емкостями электрооборудования электрических систем, при оперативных переключениях и при перемежающихся дуговых замыканиях на землю. При этом возникают скачки напряжения и тока в обмотке нелинейной катушки. Обмотка не рассчитана на работу в таком режиме и протекание токов, превышающих допустимые, вызывает разрушение изоляции и межвитковые замыкания. Это приводит к разрушению трансформатора напряжения, а иногда к пожарам в распределительных устройствах, что может быть первопричиной каскадных аварий. Необходимыми условия возникновения феррорезонанса являются наличие в схеме нелинейной индуктивности, емкостных элементов в режимах с малыми потерями. Возникновение и характер протекания феррорезонансных явлений зависят от набора и характеристик электрооборудования и параметров линий электропередач.

Для предотвращения аварий предусмотрены технические и организационные мероприятия. К техническим относят установку антиферрорезонансных электромагнитных трансформаторов напряжения, которые не должны являться причиной феррорезонансных явлений, а в случае возникновения их демпфировать. Трансформаторы этого типа дороже обычных, при этом принципы предотвращения феррорезонансных явлений изготовителями не раскрываются, однако не гарантируется полную защиту от феррорезонанса. В качестве примера можно привести аварию на подстанции «Бескудниково» на распределительном устройстве 220 кВ в конце 2011 года, где вследствие феррорезонанса поврежден трансформатор напряжения фирмы Trench TVB sm245 (рис. 1).

Для предотвращения подобных аварий, необходима обязательная проверка и анализ режимов на возможность феррорезонанса, что предусмотрено нормами проектирования. Методика, предлагаемая РД 34.20.517 [1] носит приближенный и упрощенный характер и не учитывает номенклатуру нового оборудования. Существующие программные комплексы имеют жесткую структуру и не позволяют учитывать все особенности схемы, параметры оборудования и режимов.



Рис. 1. Поврежденный трансформатор напряжения фирмы Trench TVB sm245

Целью работы являлось создание гибкой математической модели для исследования феррорезонансных режимов в электроэнергетической системе.

В качестве среды для создания модели предложено использовать пакет MatLab и его приложение SIMULINK. Достоинством данного программного продукта является наличие большой библиотеки моделей элементов электроэнергетических систем и возможность создания новых универсальных и гибких объектов. При моделировании приняты следующие допущения:

1. Распределенные активные сопротивления, индуктивности, емкости электрооборудования считаются линейными элементами и рассматриваются как сосредоточенные параметры.

2. Не учитываются активные сопротивления и индуктивности ошинок электрических подстанций.

3. Не учитываются потери на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводах трансформаторов.

Схема замещения феррорезонансной цепи представлена на рис. 2.

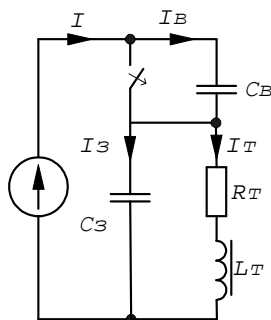


Рис. 2. Схема замещения феррорезонансной цепи: C_3 – суммарная емкость оборудования относительно земли; C_B – суммарная емкость делителей напряжения; R_T , L_T – активное сопротивление и нелинейная индуктивность намагничивания трансформатора

Уравнения описывающие схему:

$$i = i_3 + i_T;$$

$$e(t) = U_{C_6} + i \cdot R + L \frac{di_T}{dt};$$

$$e(t) = U_{C_3} + U_{C_6};$$

$$i(t) = C_6 \cdot \frac{dU_{C_6}}{dt};$$

$$i_3 = C_3 \cdot \frac{dU_{C_3}}{dt}.$$

Основная кривая намагничивания аппроксимируется выражением: $\psi = A \cdot \text{arctg}(B \cdot I) + C \cdot I$, где А, В, С – коэффициенты аппроксимации.

На рис. 3 приведена модель для анализа феррорезонансных режимов в среде SIMULINK.

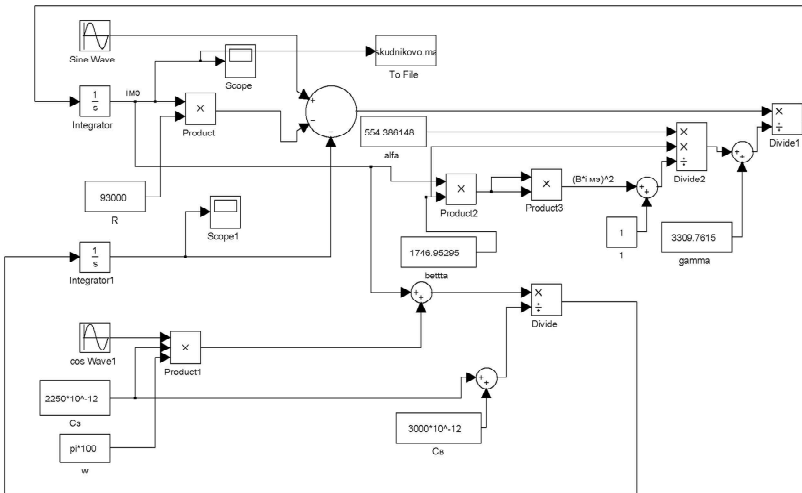


Рис. 3. Модель для анализа феррорезонансных режимов в среде SIMULINK

Оценка достоверности была проведена путем сопоставления данных о временных зависимостях тока и напряжения, полученных в результате работы алгоритма с временными зависимостями тока и напряжения, полученных в программе FERES 1.0.

Разработанная модель позволяет рассчитывать переходные процессы в потенциально феррорезонансных схемах, при различных параметрах

элементов для различных моментов коммутации, что представляет практический интерес, так как характер, уровень перенапряжений и токов зависит от этих характеристик.

Библиографический список

1. РД 34.20.517. Методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110 – 500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения. – www.normaCS.ru.

СЕКЦИЯ 16А

ИСТОРИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Председатель – д.т.н., профессор **Мартынов В.А.**

Секретарь – к.т.н., доцент **Сайкин М.С.**

*А.С. Смирнов, М.А. Тюкова, студенты;
рук. И.М. Королева, ст. преподаватель
(ИГЭУ, г.Иваново)*

«ЭЛЕКТРОГЕФЕСТ» БЕНАРДОСА

Электрическая дуга (Вольтова дуга) – физическое явление, один из видов электрического разряда в газе. Впервые она была описана в 1802 году русским ученым В.В. Петровым. Электрическая дуга является частным случаем четвертой формы состояния вещества – плазмы – и состоит из ионизированного, электрически квазинейтрального газа. Присутствие свободных электрических зарядов обеспечивает проводимость электрической дуги. Практическое применение этому явлению нашел русский ученый Н.Н. Бенардос и назвал его в честь древнегреческого бога огня «Электрогефест».

Николай Николаевич Бенардос родился 26 июня (8 июля) 1842 г. в семье, в которой основной профессией для мужского поколения была военная служба. Детство Николай Николаевич провел в имении родителей в Херсонской губернии. Получив домашнее образование, в 1862 г. поступил в Киевский университет на медицинский факультет. В 1866 г. оставив университет, поступил в Петровскую земледельческую академию в Москве. Умер Н.Н. Бенардос на 63-м году жизни 8 (21) сентября 1905 г. в г. Фастове на Украине.

Первые его изобретения касались преимущественно сельского хозяйства и транспорта. Им были разработаны усовершенствованные плуги, сеялки, жатвенная машина, снаряд для перевозки дров, пароходные колеса, металлические шпалы и многое другое. Крупным его изобретением были аккумуляторы – сначала для электрического освещения, а впоследствии для электрической сварки. Работы над созданием крупных аккумуляторных батарей привели его в 1882 г. к изобретению «Способа соединения и разъединения металлов непосредственным действием электриче-

ского тока». На это изобретение Н.Н. Бенардосу были выданы патенты в России, Франции, Бельгии, Великобритании, Италии, Германии, Швеции, Норвегии, Дании, Испании, Швейцарии, США и Австро-Венгрии. В описании к привилегии, выданной ему в Петербурге в 1886 г., сущность изобретения поясняется следующим образом: «Предмет изобретения составляет способ соединения и разъединения металлов действием электрического тока, названный «электрогефест» и основанный на непосредственном образовании вольтовой дуги между местом обработки металла, составляющим один электрод, и подводимую к этому месту рукояткой, содержащую другой электрод, соединенный с соответственным полюсом электрического тока».

По объяснению Н.Н. Бенардоса, «описанный способ применим во многих случаях: для сварки металлов, для заливки трещин, раковин и пр., для осталевания инструментов, для прикрепления хомутов, ребер и т.п., в судостроении – для постройки непроницаемых перегородок, в артиллерии – для снарядов с герметической оболочкой и т.д.». Современник Н.Н. Бенардоса, русский ученый, физик и электротехник Дмитрий Александрович Лачинов, писал: «На днях мы присутствовали на опытах электрического паяния в мастерской г. Бенардоса в сообществе нескольких техников и ученых, которые были чрезвычайно заинтересованы новым изобретением и по окончании опытов долго продолжали обсуждать все виденное...». «Самый опыт, – продолжал Д.А. Лачинов, – производит необычайное впечатление на неподготовленного зрителя. Допустим, что спаиваются два железных листа встык: сложив их краями, мастер берет паяльник в руку и прикасается им ко шву. В то же мгновение, из угля, с взрывом, вырывается голубоватая вольтова дуга более сантиметра толщиной, окруженная широким желтым пламенем и по временам достигающая 5 – 6 сантиметров длины. Управляемая рукою мастера, дуга начинает лизать линию спайки; то место, к которому она прикоснулась, мгновенно плавится, испуская ослепительный свет и разбрасывая снопы искр, причем жидкое железо протекает в скважину между листами и соединяет их». Оборудование мастерской, в которой Н.Н. Бенардос производил свои опыты, состояло из паровой машины мощностью 20 – 23 л.с. приводившей в действие электрический генератор; параллельно генератору была подключена батарея, состоявшая из 200 аккумуляторов конструкции Бенардоса. Аккумуляторы были расположены в несколько параллельных рядов и выполняли роль буфера, принимая на себя толчки, вызываемые резкими изменениями тока. По типу мастерской Н.Н. Бенардоса были оборудованы и первые сварочные цехи того времени. Говоря далее о применении нового способа на практике, Р. Рюльман, так же как и

Д.А. Лачинов, указывал на возможность использования этого способа в производстве паровых котлов без заклепок, железных судов, при наплавке более твердой стали на различного рода инструмент и т.п.

Ф.И. Герц пришел к следующему заключению о применении электросварки: «Они так разнообразны и многочисленны, что в настоящее время мы не можем даже себе представить, как бы мы обошлись без помощи электрогефеста». К середине 90-х годов 19 века способ Н.Н. Бенардоса получил распространение в одной лишь Англии более чем на 20 заводах, а всего в разных странах – на 100 заводах. Н.Н. Бенардос изобрел не только способ сварки угольной дугой, но, и все основные способы дуговой электрической сварки. В разработанных им чертежах содержится много приспособлений и устройств, несколько систем автоматов для сварки угольным электродом, автоматы с металлическим электродом, а также угольные и металлические электроды самой разнообразной формы и сочетаний. Стремясь увеличить площадь нагрева и образовать защитную среду в зоне сварки, Н.Н. Бенардос создал сварку в струе газа. «Работа дугой совместно с газами, – писал Н.Н. Бенардос, – служит для увеличения поля нагрева и раскисления поверхностей обрабатываемых металлов». На IV электрической выставке в Петербурге в 1892 г. Н.Н. Бенардос демонстрировал целый ряд образцов изделий и приспособлений для процесса электрической сварки. «В некоторых случаях, – писал он в своей работе – дуга направляется в желаемую сторону посредством электромагнита или струи газов, служащих вместе с тем для увеличения поля нагрева вольтовой дуги и раскисления поверхностей обрабатываемых металлов. Вольтова дуга возбуждается различным образом: 1) между обрабатываемым металлом и углем; 2) между двумя металлами; 3) между двумя углями».

Прогрессивная научно-техническая общественность высоко оценила творческие работы Н.Н. Бенардоса. На IV электрической выставке в 1892 г. за успешное применение дуги в изобретенной им электрической сварке он был удостоен высшей награды Русского технического общества – золотой медали. В 1899 г. Электротехнический институт в Петербурге присвоил ему звание почетного инженера-электрика, поставив его изобретение в один ряд с такими выдающимися русскими изобретениями, как радио А.С. Попова и электролампа накаливания А.Н. Ладыгина.

Библиографический список

1. **Бочков В.Е.** Новые документы об изобретателе электросварки Н.Н. Бенардосе и ее первом промышленном применении. – Электротехника. – 1972. – № 11.
2. **Елисеев А.А., Шнейберг Я.А.** В.В. Петров: Основоположник отечественной электротехники. – Курск, 1961.
3. **Корниенко А.Н.** Н.Н. Бенардос – автор способа дуговой сварки. – Сварочное производство. – 1981. – № 7.

**Ю.М. Кокорева, А.Л. Бакиит, Н.В. Громова, студенты;
рук. В.А. Мартынов, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г.Иваново)**

«ГИМН НЕПОДВИЖНОСТИ»

Трансформаторы – самые неподвижные машины техники. «Эти надежные железные колоды...» – так, подчеркивая простоту конструкции и большой вес, назвал трансформаторы француз Жанвье.

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

У каждого технического устройства два дня рождения: открытие принципа работы и его реализация. Идею трансформатора после упорной семилетней работы по «превращению магнетизма в электричество» дал Майкл Фарадей.

29 августа 1831 года Фарадей описал в своем дневнике опыт, вошедший впоследствии во все учебники физики.

Восьмидесятье годы прошлого столетия вошли в историю техники под названием периода «трансформаторных битв». Такое необычное название они получили потому, что изобретение трансформатора явилось одним из сильнейших аргументов в пользу переменного тока.

Трансформаторы классифицируются по различным признакам:

- по признаку функционального назначения;
- в зависимости от числа фаз преобразуемого напряжения;
- в зависимости от числа обмоток;
- в зависимости от конфигурации магнитопровода;
- в зависимости от мощности;
- в зависимости от способа изготовления магнитопровода;
- в зависимости от коэффициента трансформации;
- в зависимости от вида связи между обмотками;
- в зависимости от конструкции обмотки;
- в зависимости от конструкции всего трансформатора;
- в зависимости от назначения;
- в зависимости от рабочей частоты.

Любой трансформатор любого назначения состоит из пяти компонентов: магнитопровода, обмоток, бака, крышки и вводов. Самая важная деталь – магнитопровод.

Самый мощный трансформатор изготовлен австрийской компанией «Элин» и предназначен для ТЭЦ в штате Огайо. Его мощность 975 мега-

вольт-ампер, он должен повышать напряжение, вырабатываемое генераторами – 25 тысяч вольт до 345 тысяч вольт.

В 2007 году Холдинговой компанией «Электрозавод» (Москва) был изготовлен самый мощный из ранее выпускаемых в России трансформаторов – ТЦ-630000/330 мощностью 630 МВА на напряжение 330 кВ, весом около 400 т.

Крупный трансформатор действует 94 дня из 100. Средняя нагрузка – около 55 – 65 % от расчетной.

Среди студентов давно бытует легенда о чуде, который на вопрос «Как работает трансформатор?» «находчиво» ответил: «Ууу...». Но только сегодня становится ясной причина этого шума. Частота колебаний тока у нас в стране – 50 Гц. Оказывается, если перейти на 200 Гц, вес трансформатора снизится вдвое! После десяти лет работы ученым удалось сделать работающий транзистор, используя лишь один атом фосфора. Они утверждают, что их технология легко воспроизводима – в отличие от всех прочих достижений в этой сфере.

Даже столь краткий обзор позволяет нам сделать два важных вывода. Основное достоинство трансформатора – отсутствие движущихся частей. За счет этого достигаются высокий КПД, отличная надежность, простота обслуживания. Самым главным недостатком можно считать огромный вес и габариты.

А увеличивать размеры все-таки придется: ведь мощности трансформаторов должны вырасти в ближайшие десятилетия в несколько раз.

Библиографический список

1. <http://elektrik.info/main/fakty/255-interesnye-fakty-o-transformatorax.html>.
2. **Степанов В.Н.** // Техника молодежи. – Москва. – 2006.
3. <http://ru.wikipedia.org/wiki>.

*А.А. Дугина, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, Иваново)*

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Еще сто лет назад электротехника не представляла собой самостоятельной отрасли техники. Проводились лишь первые опыты по практическому применению электрического тока. В наше время трудно предста-

вить себе жизнь без электричества. Электрическая энергия движет электропоезда, приводит в действие огромные станки и целые заводы. Современная электротехника сложилась в результате деятельности нескольких поколений ученых и изобретателей, работавших в разное время и в разных странах.

В 80-х годах прошлого столетия важнейшей комплексной научно-технической проблемой явилась проблема централизованного производства и распределения электроэнергии. Необходимо было одновременно разрешить две сложные задачи: осуществить экономическую передачу энергии на дальние расстояния и создать надежный электродвигатель, удовлетворяющий требованиям промышленного электропривода. Это решение было найдено в 1888 г. итальянским ученым Г. Феррарисом и работающим на американской фирме «Вестингауз» югославским ученым Н. Тесла, которые независимо друг от друга создали двухфазный асинхронный двигатель. Они показали, что две катушки расположенные под прямым углом и питаемые синусоидальным переменным током, сдвинутым по фазе на 90° , создают вращающееся магнитное поле. Г. Феррарис поместил в магнитное поле ротор в виде медного стакана, который вращался со скольжением относительно вращающегося магнитного поля. Такой двигатель развивал мощность 3 Вт и имел низкий к.п.д. Н. Тесла изготовил двигатель с сосредоточенными обмотками на статоре и роторе; также двигатели изготавливались в США фирмой «Вестингауз».

Двигатели Г. Феррариса и Н. Тесла не нашли широкого применения. Однако текст доклада Г. Феррариса, сделанного в Туринской академии наук в марте 1888 г., попал в руки нашего соотечественника Михаила Осиповича Доливо-Добровольского и вызвал первый импульс в серии последующих уникальных изобретений. Свои размышления над статьей Феррариса Доливо-Добровольский описал следующим образом: «Я сказал себе, что никогда электродвигатель не затормаживают, чтобы получить скольжение в 50 % т.к. в этом случае, как и в электродвигателях постоянного тока, все сгорело бы при разумно выбранных размерах частей. Если же скольжение будет сохраняться, то непонятно, почему к.п.д. должен быть мал... Я тотчас же сказал себе, что если сделать вращающееся поле по методу Феррариса и поместить в него такой короткозамкнутый якорь малого сопротивления, то этот якорь скорее сам сгорит, чем будет вращаться с небольшим числом оборотов... Мысленно я прямо представил себе электродвигатель многофазного тока с ничтожным скольжением» [1]. В начале 1889 г. опытный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором был изготовлен. Обмотка статора была выполнена трехфазной, а в качестве источника энергии был использован сконструиро-

рованный Доливо-Добровольским одноякорный вращающийся преобразователь: от трех равноудаленных точек обмотки якоря машины постоянного тока были сделаны отводы на три контактных кольца со щетками. Вот как рассуждал изобретатель коротко- замкнутого асинхронного двигателя – его инженерная логика весьма поучительна. С точки зрения уменьшения сопротивления обмотки ротора, лучшим конструктивным решением мог бы быть ротор в виде медного цилиндра (как в двигателе Феррариса). Но медь – немагнитный материал, и энергетические характеристики такого двигателя были бы невысоки. Если же медный цилиндр заменить стальным, то магнитный поток резко возрастает, но вместе с тем электрическая проводимость стали мала, поэтому характеристики опять не могут быть высокими. Выход из этого противоречия: для уменьшения магнитного сопротивления изготовить ротор в виде стального цилиндра, по периферии которого просверлить каналы, куда уложить медные стержни. На лобовых частях эти стержни электрически соединялись друг с другом. Так родилось «беличье колесо» («беличья клетка») – одно из самых оригинальных конструктивных решений в истории мирового электромашиностроения. Позднее он предложил многоякорные, в частности, двойные «беличьи клетки». Изготавливался первый короткозамкнутый асинхронный двигатель в мастерских фирмы АЭГ осенью 1888 г.

В настоящее время асинхронные двигатели нашли очень широкое применение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Их используют в электроприводе металлорежущих станков, подъемно-транспортных машин, транспортеров, насосов, вентиляторов. Мало-мощные двигатели используются в устройствах автоматики. При этом они имеют диапазон мощностей от 0,06 до 100 кВт и могут быть изготовлены для различных условий эксплуатации: химически активной атмосфере животноводческих помещений, большой запыленности зерноочистительно-сушильных комплексов, высокой влажности и кормоцехах, под открытым небом, под водой и т.д. Эти условия, осложняя эксплуатацию электроприводов, требуют применения более прочного, надежного простого оборудования, характерного для электроприводов с асинхронными электродвигателями. Асинхронные двигатели изготавливаются на Владимирском электромоторном заводе: серии 4А, 5А, 6А; Ярославской машиностроительном заводе: серии RA, A; на Лобненском электротехническом заводе (ЗАО «Мосэлектромаш»): серии 5А, 6А.

Библиографический список

1. **Веселовский О.Н.** У истоков электромеханики. К столетию асинхронного двигателя // Электротехника. – 1988. – № 7.

А.А. Заякина, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, Иваново)

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ТЕХНИКЕ

Понятие «магнитная жидкость» широко применяют в научно-технической литературе с 60-х годов XX в., хотя, строго говоря, подобный термин использовали физики и двумя столетиями раньше для объяснения магнитных свойств вещества.

Магнитная жидкость – жидкость, сильно поляризующаяся в присутствии магнитного поля.

Магнитные жидкости представляют собой коллоидные системы, состоящие из ферромагнитных или ферримангнитных частиц нанометровых размеров, находящихся во взвешенном состоянии в жидкости-носителе, в качестве которой обычно выступает органический растворитель или вода. Для обеспечения устойчивости такой жидкости ферромагнитные частицы связываются с поверхностно-активным веществом. Оно образует защитную оболочку вокруг частиц и препятствующем их слипанию.

Магнитные жидкости были почти одновременно получены в США и России в середине 60-х годов двадцатого века. Первые магнитные жидкости были получены американцем Соломоном Стивенем Пайпеллом, в результате механического измельчения частиц магнетита Fe_3O_4 в шаровых мельницах. Он запатентовал свое изобретение в 1963 и в 1965 годах.

В СССР родоначальником магнитожидкостных технологий является профессор ИГЭУ Дмитрий Васильевич Орлов. В 1965 году по его инициативе и под его руководством в Ивановском энергетическом институте начались работы по созданию магнитных жидкостей и герметизаторов на их основе.

В настоящее время магнитные жидкости активно изучают в большинстве развитых стран мира.

Магнитные жидкости используются в следующих технических областях:

- в электронных устройствах для создания жидких уплотнительных устройств вокруг вращающихся осей в жестких дисках, также используются в динамиках для высоких частот, с целью отвода тепла от звуковой катушки. Одновременно она работает механическим демпфером, подавляя нежелательный резонанс;
- в машиностроении магнитная жидкость применяется для снижения трения. Нанесенная на поверхность достаточно сильного магнита она позволяет ему скользить по гладкой поверхности с минимальным сопро-

тивлением. «Ferrari» использует магнитореологические жидкости в некоторых моделях машин для улучшения возможностей подвески. Под воздействием поля, создаваемого электромагнитом, контролируемого компьютером, подвеска может мгновенно менять свою жесткость;

- в оборонной промышленности. Военно-воздушные силы США внедрили радиопоглощающее покрытие на основе магнитной жидкости. Снижая отражение электромагнитных волн, оно помогает уменьшить эффективную площадь рассеяния самолета;

- в авиакосмической промышленности. NASA проводило эксперименты по использованию магнитной жидкости в замкнутом кольце как основу для системы стабилизации космического корабля в пространстве. Магнитное поле воздействует на магнитную жидкость в кольце, изменяя момент импульса и влияя на вращение корабля. В СССР магнитная жидкость была использована в магнитожидкостных уплотнениях космической орбитальной станции «Мир»;

- в медицине. Ведется много экспериментов по использованию магнитных жидкостей для удаления опухолей и лечения язвы желудка, перекрытия тока крови в крупных сосудах во время операции. Другое направление – введение фармакологических препаратов в организм с помощью магнитных жидкостей. Третье – получение рентгеноконтрастных веществ, управляемых магнитным полем;

- в теплопередаче. Если воздействовать магнитным полем на магнитную жидкость с разной восприимчивостью (например, из-за температурного градиента) возникает неоднородная магнитная объемная сила, что приводит к форме теплопередачи называемой термомагнитная конвекция. Такая форма теплопередачи может использоваться там, где не годится обычная конвекция, например, в микроустройствах или в условиях пониженной гравитации;

- в генераторах. Замерзшая или полимеризованная магнитная жидкость, находящаяся под действием постоянного (подмагничивающего) и переменного магнитных полей, является источником упругих колебаний с частотой переменного поля, что может быть использовано для генерации ультразвука.

Спрос в научно-технических работниках и в магнитных жидкостях постоянно растет, но, к большому сожалению, эти тенденции имеют место, в основном, за рубежом.

Библиографический список

1. **Фертман В.Е.** Магнитные жидкости: справ. пособие. – Минск: Вышэйшая школа, 1988.
2. <http://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения 1.03.2012).

*К.А. Куколкина, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, Иваново)*

МОНОРЕЛЬСОВЫЙ ТРАНСПОРТ – ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Монорельс – это транспортная система, в которой вагоны перемещаются по балке-монорельсу, установленной на отдельных опорах или эстакаде. Компромисс между канатной дорогой и линиями традиционного метрополитена. Действительно, зачем использовать два пути, если можно только один или вообще ни одного?

Вопреки всеобщему заблуждению, что Россия никоим образом не относится к изобретению монорельса, первая такая дорога была создана именно у нас, причем на целых 15 лет раньше первого паровоза.

Первые электрические монорельсовые дороги появились в США и Германии, например дорога Enos Electric Railway, была построена в 1887 году в Гринвилей, Нью-Джерси.

Монорельсовые дороги применяются в следующих областях:

- в парках развлечений, зоопарках, в больших ТЦ и т.д.;
- в аэропортах в качестве внутреннего транспорта;
- для прямой связи аэропорта с центром города;
- в роли городского общественного транспорта – как разновидность метрополитена.

Можно разделить монорельсовые дороги на ряд очень специфических разновидностей, общим среди которых является только монорельс.

а) Дороги с вагонами на воздушной подушке. Впервые идея создания монорельса на воздушной подушке для достижения скоростей 720 км в час принадлежала К.Э. Циолковскому (1934). При этом впервые было предложено использовать гибкие закраины (по современной терминологии «юбка») для снижения расхода воздуха и мощности, потребной для создания воздушной смазки. Монорельс на воздушной подушке был построен и пущен в эксплуатацию во Франции в конце 60-х годов.

б) Дороги с вагонами на магнитной подушке. Первую модель вагона на магнитном подвесе построил в 1910 году Э. Башеле во Франции. В то же время, в 1911 году профессор Томского технологического института Б.П. Вайнберг изобрел поезд на электромагнитной подвеске, приводимый в движение линейным синхронным электродвигателем. Использование электромагнитов позволяло реализовывать усилия, необходимые для поддержания на весу вагонов с пассажирами и позволяло видеть в магнитопланах не просто оригинальные физические опыты, а реальное транспортное средство. На трассах такого типа предполагалось достичь скорости 800 – 1000 км/ч.

Существует три основных технологии магнитного подвеса поездов:

- 1) на сверхпроводящих магнитах (электродинамическая подвеска);
- 2) на электромагнитах (электромагнитная подвеска);
- 3) на постоянных магнитах; это новая и потенциально самая экономичная система.

Состав левитирует за счет отталкивания одинаковых полюсов магнитов и, наоборот, притягивания разных полюсов. Движение осуществляется линейным двигателем. Серьезной проблемой проектирования является большой вес достаточно мощных магнитов, поскольку требуется сильное магнитное поле для поддержания в воздухе массивного состава.

Современный монорельс на магнитном подвесе – магнитоплан или маглев. Скорость, достижимая маглевом, сравнима со скоростью самолета и позволяет составить конкуренцию воздушным сообщениям на малых (для авиации) расстояниях (до 1000 км). К его достоинствам также относятся:

- достаточно низкое потребление электроэнергии (энергия у маглева расходуется в три раза эффективнее, чем у автомобиля и в пять раз – чем у самолета);

- снижение эксплуатационных затрат в связи со значительным уменьшением трения деталей;

- низкий шум.

Однако маглев имеет и свои недостатки:

- высокая стоимость создания и обслуживания колеи (стоимость 1 км маглев-трассы \approx 1 км метро).

- создаваемое магнитной подвеской электромагнитное поле может оказаться вредным для поездных бригад и/или окрестных жителей;

- рельсовые пути стандартной ширины, перестроенные под скоростное движение, остаются доступными для обычных пассажирских и пригородных поездов. Путь маглева ни для чего другого не пригоден.

в) Третий вид монорельсовых дорог – традиционный, где вагоны перемещаются на колесах, как правило, с пневматическими шинами.

Традиционный монорельс, в свою очередь, подразделяется на:

- навесной (вагоны перемещаются над монорельсом);

- подвесной (вагоны подвешены под балкой монорельса).

Транспорт такого типа нужен, чтобы совместить компактность канатных дорог с надежностью традиционного метрополитена. Недаром первые монорельсовые дороги являлись именно подвесными. Яркий пример такой дороги – в г. Вупперталь, Германия, она функционирует вот уже на протяжении 110 лет. Несущий трос канатных путей в этом устройстве заменен на рельс железнодорожного типа, и каждый вагон снабжен собственным приводом. Однако в данной конструкции не предусмотрено боковой поддержки, что определяет наличие одного из главных недостатков подвесных дорог – качки.

Также подвесная система может быть исполнена несколькими способами: симметричным и несимметричным (в наше время существует монорельс с боковой подвеской).

В 1989 году на «украинской ВДНХ» появилась модель – копия проектной монорельсовой дороги в масштабе 1:5, вагоны по отношению к балке располагались там не сверху, и не снизу, а сбоку. Боковая подвеска вагона дает целый ряд существенных преимуществ:

- для двухпутного движения можно использовать одну балку;
- на значительной части пути балка может быть выполнена в виде стенки из железобетонных панелей или монолитного железобетона;
- благодаря устойчивости вагона при боковой подвеске можно снизить вес ходовых частей.

Другая особенность системы – сбалансированная подвеска вагонов на восьми катках, что позволяет выполнять путь в вертикальной плоскости не из кривых балок, а из прямых, составленных под углом.

Многие достоинства монорельса только доказаны на практике, но не все реализованы в действительности. И это не из-за избытка воображения при несоответствии техническим возможностям, а скорее, из-за недостатка финансирования монорельсовых дорог. Даже несмотря на их окупаемость, не все предприниматели успели поверить в этот вид транспорта. А между тем, стараниями ученых, недостатки монорельса постепенно превращаются в достоинства!

Библиографический список

1. **Janetzki E.F.J.** Monorails // One-Track Wonders: Early Monorails. – De Alk.
2. **История монорельса** // Знание-сила. – Б.м. – 2009. – № 12. – С. 62.
3. **Измеров О.** Неизвестный отечественный монорельс.
4. **Чиркин В.В., Петренко О.С., Михайлов А.С., Галонен Ю.М.** Пассажирские монорельсовые дороги. – М.: Машиностроение, 1969.

И.С. Ильченко, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г.Иваново)

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

В последние годы как в научно-технической литературе, так и в популярных изданиях появляются многочисленные публикации о нетради-

ционных возобновляемых источниках энергии (НВИЭ). Оценки возможностей их широкого применения колеблются от восторженных до умеренно пессимистических. «Зеленые» призывают вообще заменить всю традиционную топливную и атомную энергетику на использование НВИЭ. Мнения специалистов гораздо более осторожны [1]. Что же значит термин нетрадиционные источники энергии? Альтернативный (нетрадиционный) источник энергии — способ, устройство или сооружение, позволяющее получать электрическую энергию (или другой требуемый вид энергии) и заменяющий собой традиционные источники энергии, функционирующие на нефти, добываемом природном газе и угле. Цель поиска альтернативных источников энергии — потребность получать ее из энергии возобновляемых или практически неисчерпаемых природных ресурсов и явлений. Во внимание может браться также экологичность и экономичность. Альтернативная энергетика – совокупность перспективных способов получения энергии, которые распространены не так широко, как традиционные, однако представляют интерес из-за выгоды их использования при низком риске причинения вреда экологии района [2]. В отличие от ископаемых топлив нетрадиционные формы энергии не ограничены геологически накопленными запасами. Это означает, что их использование и потребление не ведет к неизбежному исчерпанию запасов. Однако основной фактор при оценке целесообразности использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии – стоимость производимой энергии в сравнении со стоимостью энергии, получаемой при использовании традиционных источников. Особое значение приобретают нетрадиционные источники для удовлетворения локальных потребителей энергии. Именно поэтому в данное время на возобновляемые (альтернативные) источники энергии приходится всего около 1 % мировой выработки электроэнергии. Речь идет прежде всего о геотермальных электростанциях (ГеоТЭС), которые вырабатывают немалую часть электроэнергии в странах Центральной Америки, на Филиппинах, в Исландии; Исландия также являет собой пример страны, где термальные воды широко используются для обогрева, отопления. Приливные электростанции (ПЭС) пока имеются лишь в нескольких странах – Франции, Великобритании, России, Индии, Китае. Солнечные электростанции (СЭС) работают более чем в 30 странах. В последнее время многие страны расширяют использование ветроэнергетических установок (ВЭУ). Больше всего их в странах Западной Европы (Дания, ФРГ, Великобритания, Нидерланды), в США, в Индии, Китае. Дания получает 25 % энергии только лишь из ветра [3]. Все знают что, использование любого вида энергии и производство электроэнергии сопровождается образованием многих загрязнителей воды и воздуха. Перечень таких загрязнителей удивительно дли-

нен, а их количества чрезвычайно огромны. Вполне естественно возникает вопрос, всегда ли использование энергии и производство электроэнергии должно сопровождаться разрушением окружающей среды. И если правда, что любой вид человеческой деятельности неизбежно оказывает вредное воздействие на природу, то степень этого вреда различна. Мы не можем не влиять на среду, в которой живем, поскольку для поддержания жизненных процессов как таковых необходимо поглощать и использовать энергию.

Человек, безусловно, оказывает влияние на окружающую его среду, однако в природе существуют естественные уравнивающие механизмы, которые поддерживают среду и обитающие в ней сообщества в состоянии равновесия, когда все изменения происходят достаточно медленно. Тем не менее во многих случаях хозяйственная деятельность человека нарушает равновесие, создаваемое этими механизмами, что приводит к быстрым изменениям условий окружающей среды, с которыми ни человек, ни природа не могут успешно справиться. Традиционное производство энергии, дающее огромные количества загрязнителей воды и воздуха, – один из видов такой деятельности человека. Именно поэтому перспективы использования возобновляемых источников энергии связаны с их экологической чистотой, низкой стоимостью эксплуатации и ожидаемым топливным дефицитом в традиционной энергетике.

Библиографический список

1. **Тарнижевский Б.** Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: вчера, сегодня, завтра // ЭСКО. – 2006. – № 6.
2. **Лосюк Ю.А., Кузьмич В.В.** Нетрадиционные источники энергии. – М: Технопринт, 2005.
3. **Проблемы** альтернативной энергетики // Инновации и технологии.

А.А. Катрунцева, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

ТРАМВАЙ. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ

Трамвай (от англ. tram (вагон, вагонетка) и way (путь), название произошло, по одной из версий, от вагонеток для перевозки угля на шахтах Великобритании) – вид уличного и частично уличного рельсового общественного транспорта для перевозки пассажиров по заданным мар-

шрутам (обычно на электротяге) используемый преимущественно в городах. Как вид транспорта трамвай является старейшим видом городского пассажирского общественного транспорта и возник в первой половине XIX века – первоначально на конной тяге. Электрический трамвай появился в конце XIX века – в 1881 году в Германии. После расцвета, эпоха которого пришлась на период между мировыми войнами, начался упадок трамвая, однако уже где-то с 1970-х годов вновь наблюдается значительный рост популярности трамвая, в том числе по экологическим причинам и благодаря технологическим усовершенствованиям.

Большинство трамваев используют электротягу с подачей электроэнергии через воздушную контактную сеть с помощью токоприемников (пантографов, или штанг, реже – бугелей), однако существуют также трамваи с питанием от контактного третьего рельса или аккумуляторов.

Для трамвайных систем бывшего СССР характерны две схемы работы систем энергоснабжения: централизованная и децентрализованная.

- Централизованная система была основной и нередко единственной схемой до 1960-х гг. и представляет собой наличие крупных мощных тяговых подстанций с несколькими понизительно-выпрямительными блоками для обслуживания всех прилегающих к ней линий, либо линий, находящихся от них на расстояниях до 1 – 2 км. Как правило, такие тяговые подстанции находятся в местах высокой плотности трамвайных линий: в центрах городов, в районах слияния нескольких линий, вблизи трамвайных депо и т.п.

- Децентрализованная система стала распространяться с 1960-х гг. и является основной для длинных вылетных линий трамвая и, например, из центра города вдоль какого-нибудь шоссе на окраину, для загородных линий, для линий от станций метро в отдаленные микрорайоны и т.п. В такой системе вдоль линии каждые 1 – 2 км расположены маленькие автоматические тяговые подстанции малой мощности, нередко имеют только один понизительно-выпрямительный блок. На линии возле подстанции размещается изолятор, делящий линию на два участка и такая малая тяговая подстанция запитывает оба участка линии – до следующих изоляторов, которые находятся у других подстанций. Эта схема более прогрессивна, обеспечивает минимальные энергопотери вследствие коротких фидерных участков и большую стабильность работы в случае какой-либо аварии на конкретной подстанции, так как секционированные участки линии остаются запитанными от соседних подстанций.

Номинальное напряжение на выходе тяговой подстанции – 600 В, номинальным напряжением на токоприемнике подвижного состава считается 550 В. В некоторых городах мира принято напряжение 825 В (на территории стран бывшего СССР такое напряжение использовалось

только для вагонов метро). В большинстве новых трамвайных систем Европы принято стандартное напряжение 750 вольт.

В городах, где трамвай сосуществует с троллейбусом, эти виды транспорта, как правило, имеют общее энергохозяйство.

Старожилы хорошо помнят времена, когда трамвай был визитной карточкой города, его любили, им гордились. Сейчас, к сожалению, трамвай не пользуется былой популярностью. «Демонтаж» и «ликвидация» – первые слова, которые приходится слышать при упоминании о нем. Мало кто вспомнит, что ивановский трамвай в 2004 году отметил 70-летний юбилей, строили его всем городом на многочисленных субботниках. Трамвай помогал городу во время Великой отечественной войны, среди работников депо много ветеранов. За время работы предприятия сформировалось трудовые династии Кубышиных, Захаровых, Слесаренко и др.

Каждый день, начиная с далекого 1934 года, ивановский трамвай выходил на улицы, и по 2008 год работал на благо горожан. Первое упоминание трамвая в Иваново-Вознесенске относится к 3 августа 1901, когда на имя «Его Превосходительства Господина Городского Головы» поступило заявление от предпринимателя и учредителя Акционерного Общества Кишиневского и Николаевского трамваев дворянина Михаила Николаевича Романовича о сооружении конно-железных дорог (конки) в форме городского предприятия.

Следующим стал крестьянин Шуйского уезда Мефодий Журавлев, который в августе 1911 года предложил построить уже электрический трамвай в городе Иваново-Вознесенск. Городская Дума тогда отложила его проект и занялась поиском инвесторов для строительства трамвая. Однако интересен тот факт, что гораздо позже построенная трамвайная сеть в большей части повторяла проект Мефодия Журавлева.

В дореволюционные годы строительство трамвайной сети в Иваново так и не началось – этому мешало отсутствие средств в городской казне, отсутствие платежеспособного спроса (промышленные города в Российской империи трамвая, как правило, не имели, поскольку рабочие жили неподалеку от предприятий) и низкий статус города.

После Октябрьской революции статус Иванова резко вырос (город стал административным центром), помимо промышленности в городе стала развиваться сфера услуг и возникла потребность в перевозках между разными районами города, жилыми кварталами, вокзалом и т.д. К 1934 году число жителей города составляло уже более 200 тыс. человек, при этом транспортное обслуживание осуществлялось лишь несколькими автобусами, ходившими по центру города.

Главными экономическими аргументами в пользу строительства трамвая в Иванове стали меньшая, чем у автобусов, себестоимость перевозок, меньшие затраты по устройству коммуникаций трамвая, положительный опыт эксплуатации трамваев в других городах и большие затраты на благоустройство городских дорог, чтобы по ним могли ездить автобусы.

23 февраля 1934 года в газете «Рабочий край» № 45 вышла статья «Трамвай в Иванове – проект строительства утвержден». Далее ивановский трамвай развивался, но в последствии ликвидирован и город перешел на троллейбусную систему.

Сколько бы ни говорили о трамвае, как об устаревшем, не перспективном транспорте, все такие есть любители трамвая. Они видят в нем транспорт будущего: удобный, быстрый, вместительный.

Библиографический список

1. **Наука** и Жизнь.
2. **Compressed Air Trams**. <http://www.tramwayinfo.com>.
3. **Тархов С.А.** Первый российский трамвай // Вестник ГЭТ России. –1996. – № 2. – С. 6 – 11.
4. **Трамвайный** форум. <http://forum.tr.ru>.
5. **Орский** трамвай. <http://orsk-tramway.narod.ru>.
6. **Ивановский** трамвай. <http://www.ivanovo.tramvaj.ru>.
7. **Трамвайные** вагоны. <http://vagons.tramvaj.ru>.
8. **Пономарев А.А., Иеропольский Б.К.** Подвижной состав и сооружения городского электротранспорта. – М.: Транспорт, 1981.
9. **Ивановский** трамвай: 70 лет с городом // Иваново. – 2004. – С. 4.

*В.С. Костерин, И.Д. Замыслов, студенты;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, Иваново)*

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТРОЛЛЕЙБУСОВ

Начало своего развития троллейбус берет в 1880 г. Идея движимого электроэнергией средства передвижения впервые была высказана проживавшим в Британии немецким инженером доктором Вильгельмом Сименсом в журнале «Society of Arts» в 1880 году.

Электромобиль был первым транспортным средством в мире, которым передвигался как троллейбус. Он был представлен общественности 29 апреля 1882 изобретателем доктором Вернер фон Сименсом в Хален-

зее. Electromote представлял собой четырехколесную повозку с приводом на задние колеса от двух электромоторов мощностью 2,2 кВт через цепную передачу. Так называемый троллейбус получал питание от контактной сети постоянного тока напряжением 550 В при помощи гибкого кабеля, тянущего небольшую восьмиколесную тележку, катившуюся по контактным проводам. Это экспериментальное транспортное средство уже соответствовало всем техническим критериям типичного троллейбуса. В 1909 году была впервые испытана система съема электричества инженера Макса Шиманна, с многочисленными изменениями дожившая до наших дней.

Первую троллейбусную линию построили в СССР, в 1933 году в Москве. Первыми троллейбусами СССР были машины ЛК-1 (Названы в честь Лазаря Кагановича). Средняя скорость движения составляла 36 км/ч. Данный троллейбус является высокопольным для внутригородских пассажирских перевозок. Он имел вагонную компоновку, деревянный кузов с металлической обшивкой и роликовые головки токоприемников. В июне 1937 г было налажено производство новых машин ЯТБ-1. Образцом для ЯТБ-1 стали британские троллейбусы.

В январе 1937 года началась разработка модели ЯТБ-2, тогда же для совершенствования конструкции кузова на заводе было организовано конструкторско-технологическое кузовное бюро. А в ноябре 1937 года завод приступил к серийному производству новой модели, являющегося модернизированной моделью ЯТБ-1 и практически ни чем от нее не отличалась.

В 1938 году в Москве эксплуатировались двухэтажные троллейбусы ЯТБ-3. Опыт эксплуатации показал, что они плохо подходят для наших регионов. В конце 1938 года было произведено обновление модели ЯТБ-2. Троллейбус ЯТБ-4, сохранил в основном неизменный внешний вид ЯТБ-2, получил новый более мощный двигатель ДК-2016, который на 23 % мощнее и легче двигателя ДТБ-60, поэтому максимальная скорость поднялась до 55 км/ч.

Осенью 1940 г. началась работа над машиной ЯТБ-5 с цельнометаллическим кузовом. Новшествами троллейбуса стали расположение тягового двигателя, который установили в центре троллейбуса, тем самым удалось изготовить две равные полуоси. Усилили передний мост, было облегчено рулевое управление.

После экспериментальных ТБУ-1 был построен и успешно испытан ЗиУ-5 – троллейбус нового поколения. На момент своего появления был воплощением самых передовых идей в троллейбустроении – были применены несущий кузов, автоматическая косвенная реостатно-контакторная система управления, разделение электрических цепей

на высоко- и низковольтные части, многочисленные электрические устройства вместо ручных или пневматических аналогов на предыдущих моделях троллейбусов.

В 1971 году был построен ее прототип, ставший впоследствии самым массовым троллейбусом мира ЗиУ-9. Кроме трехдверного стального кузова «граненого» дизайна с дополнительной ступенью пневмоподвешивания, у ЗиУ-9 не было никаких существенных новшеств в конструкции и оборудовании по сравнению с ЗиУ-5. Он является высокопольным троллейбусом большой вместимости для внутригородских пассажирских перевозок.

ЗиУ-10 – шарнирно-сочлененный трехосный вариант российского троллейбуса ЗиУ-9. Первые опытные образцы были построены в 1978 году. В 1986 году завод имени Урицкого освоил выпуск шарнирно-сочлененного трехосного троллейбуса особо большой вместимости ЗиУ-683Б с тиристорно-импульсной системой управления, позволяющей экономить до 25 % электроэнергии.

В заключении хочется отметить, что троллейбус как транспортное средство для перевозки пассажиров имеет почти 125-летнюю историю.

Сегодня более 300 городов мира имеют троллейбусное сообщение.

Библиографический список

1. **Корягина Е.Е., Коськин О.А.** Электрооборудование трамваев и троллейбусов: учеб. для техникумов городского транспорта. – М.: Транспорт, 1982.
2. **Ефремов И.С.** Троллейбусы (теория, конструкция, расчет): учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1969.
3. **Пономарев А.А., Иеропольский Б.К.** Подвижной состав и сооружения городского электротранспорта. – М.: Транспорт, 1981. — 274 с.
4. www.politronika.ru.
5. www.wikipedia.org.
6. www.trolley.ruz.net.

С.А. Константинова, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

ШАРОВАЯ МОЛНИЯ – УНИКАЛЬНОЕ ЯВЛЕНИЕ ПРИРОДЫ. ГИПОТЕЗЫ. ЗАГАДКИ

Шаровая молния – редкое природное явление, единой физической теории возникновения и протекания которого к настоящему времени

не представлено. В лабораторных условиях похожие, но кратковременные явления удалось получить несколькими разными способами. Но о природе естественной шаровой молнии вопрос остается открытым. По состоянию на конец XX века не было создано ни одного опытного стенда, на котором в масштабе природное явление искусственно воспроизводилось бы тождественным описаниям очевидцев шаровой молнии.

Существуют около 200 теорий, объясняющих явление, но ни одна из них не получила абсолютного признания в академической среде. Ниже представлены некоторые из них.

1. Гипотеза Капицы: между облаками и землей возникает стоячая электромагнитная волна, и когда она достигает критической амплитуды, в каком-либо месте (чаще всего, ближе к земле) возникает пробой воздуха, образуется газовый разряд. В этом случае шаровая молния оказывается как бы «нанизана» на силовые линии стоячей волны и будет двигаться вдоль проводящих поверхностей. Стоячая волна тогда отвечает за энергетическую подпитку шаровой молнии.

2. Принципиально другая гипотеза Б.М. Смирнова, занимавшегося проблемой шаровой молнии много лет. В его теории ядро шаровой молнии – это переплетенная ячеистая структура, нечто вроде аэрогеля, которая обеспечивает прочный каркас при малом весе. Только нити каркаса – это нити плазмы, а не твердого тела. И энергетический запас шаровой молнии целиком скрывается в огромной поверхностной энергии такой микропористой структуры. Термодинамические расчеты на основе этой модели, в принципе, не противоречат наблюдаемым данным.

3. Еще одна теория объясняет всю совокупность наблюдаемых явлений термохимическими эффектами, происходящими в насыщенном водяном паре в присутствии сильного электрического поля. Энергетика шаровой молнии здесь определяется теплотой химических реакций с участием молекул воды и их ионов. Автор теории уверен, что она дает четкий ответ на загадку шаровой молнии.

4. Следующая теория предполагает, что шаровая молния – это тяжелые положительные и отрицательные ионы воздуха, образовавшиеся при ударе обычной молнии, рекомбинации которых мешает их гидролиз. Под действием электрических сил они собираются в шар и могут довольно долго сосуществовать. До тех пор пока не разрушится их водяная «шуба». Это объясняет еще и тот факт, как различный цвет шаровой молнии и его прямая зависимость от времени существования самой шаровой молнии – скорости разрушения водяных «шуб» и начало процесса лавинной рекомбинации.

5. Другая теория предполагает, что шаровая молния – это ридберговское вещество. Группа L. Holmlid занимается приготовлением ридбергов-

ского вещества в лабораторных условиях пока отнюдь не с целью производства шаровых молний, а в основном с целью получения мощных электронных и ионных потоков, используя то, что работа выхода ридберговского вещества очень мала, несколько десятых электронвольта. Предположение, что шаровая молния является ридберговским веществом, описывает гораздо больше ее наблюдаемых свойств, от способности возникать при разных условиях, состоять из разных атомов, и до способности проходить сквозь стены и восстанавливать шарообразную форму. Конденсатом ридберговского вещества пытаются также объяснить плазмоды, получаемые в жидком азоте.

6. Неожиданный подход к объяснению природы шаровой молнии предлагается В.П. Торчигиным [3], согласно которым шаровая молния является некогерентным оптическим пространственным солитоном, кривизна которого отлична от нуля. В переводе на более доступный язык шаровая молния представляет собой тонкий слой сильно сжатого воздуха, в котором по всевозможным направлениям циркулирует обычный интенсивный белый свет. Этот свет за счет создаваемого им электрострикционного давления обеспечивает сжатие воздуха. В свою очередь, сжатый воздух выступает в качестве световода, который препятствует излучению света в свободное пространство. Можно сказать, что шаровая молния – это самоограниченный интенсивный свет или световой пузырь, возникший из обычной линейной молнии. Как и обычный световой луч, световой пузырь в земной атмосфере смещается в направлении а показателя преломления воздуха, в котором он находится.

7. Пермский физик Сергей Федосин в ряде работ представил электронно-ионную модель шаровой молнии в [4]. Согласно этой модели, шаровая молния есть сгусток очень горячего ионизированного воздуха с общим положительным зарядом, оболочка которого состоит из быстро вращающихся электронов с общим током до $1,4 \cdot 10^5$ А. Целостность молнии поддерживается балансом электромагнитных сил, действующих между зарядами. Положительные ионы внутри молнии распределены свободно вследствие сферической симметрии, и притягивают к себе электроны оболочки, удерживая их от разлета.

8. В 1974 г. И.П. Стахановым была предложена так называемая кластерная гипотеза [2], согласно которой физическую природу шаровой молнии можно объяснить на основе понятия кластер.

Кластер – это положительный или отрицательный ион, окутанный плотным облаком из нейтральных молекул. Рассмотрим молекулу воды. Она является полярной молекулой, поскольку центры ее положительных зарядов не совпадают с центрами отрицательных зарядов. Она в силу

своей полярности удерживается вблизи ионов силами электростатического притяжения. Гидратированным называется ион, окруженный молекулами воды. Согласно гипотезе Стаханова, вещество шаровой молнии состоит из таких комплексов.

Таким образом, кластерная гипотеза Стаханова утверждает, что шаровая молния – это самостоятельно существующее тело (т.е. тело, к которому не подводится энергия от внешних источников. Это тело состоит из тяжелых положительных и отрицательных ионов, рекомбинация которых серьезно замедлена из-за гидратации ионов.

В отличие от остальных, данная гипотеза достаточно хорошо поясняет все свойства шаровой молнии, которые были выявленные в результате многочисленных наблюдений за этим явлением. И все же нужно признать, что пока это – всего лишь одна из самых правдоподобных гипотез только гипотеза, которая не подтверждена никакими фактами.

Библиографический список

1. Григорьев А.И. Шаровая молния. – Ярославль: ЯрГУ, 2006.
2. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Торчигин В.П., Торчигин А.В. Шаровая молния как концентрат света // Химия и жизнь. – 2003. – № 1. – С. 47 – 49.
4. Федосин С. Современные проблемы физики. В поисках новых принципов. – М.: Издательство УРСС, 2002.

*В.М. Екимова, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

УМНЫЕ СЕТИ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ В РОССИИ

В нашем современном мире часто встают вопросы о том, как избежать потерь электроэнергии, как снизить государственные расходы на электричество, как уменьшить плату за коммунальные услуги, как улучшить экологическую ситуацию и многие другие. Помочь в решении этих проблем могут «интеллектуальные» сети. Еще с 70-х годов XX века в Советском Союзе, США и Европе проводились эксперименты по созданию «умных» сетей, которые сегодня носят название Smart Grid. Технология SMART (Self Monitoring Analysis and Reporting Technology) – технология самодиагностики, анализа и отчета – была создана для повышения надежности работы оборудования, возможности контролировать его на расстоянии.

«Умные сети» или «Smart Grid» – очень масштабное направление в современной энергетике. Смысл «Smart Grid» в том, чтобы сделать «интеллектуальными» генерацию, передачу и распределение электрической энергии, насытить электрические сети современными средствами диагностики, электронными системами управления, алгоритмами, техническими устройствами типа ограничителей токов короткого замыкания сверхпроводящих линий и многим-многим другим, что сегодня появилось в науке и технике.

Сегодня «энерговооруженность» потребителей повысилась в разы, практически каждая семья использует мощные бытовые приборы. Этими приборами тоже можно управлять. Уже разработаны системы управления стиральными машинами, которые будут включаться не в режиме пиковых нагрузок, а в момент низкой загрузки сети. Есть системы, предполагающие включение отопления в ночные периоды, когда сеть разгружена. Для энергетиков это даст дополнительный объем транспорта электроэнергии, для потребителя – удобство использования. Кроме удобства и комфорта главным назначением такой системы является экономия энергоресурсов за счет более равномерной нагрузки энергосистемы. Каждый субъект сети получит более равномерно загруженное оборудование, а электросетевой компании не понадобится вводить дополнительные мощности и расширять инфраструктуру сети, чтобы выдержать нагрузки в часы пик.

Главным преимуществом новой системы является двусторонняя связь с потребителем электроэнергии. Технология Smart Grid действует через систему «интеллектуальных» счетчиков, установленных на предприятиях, в квартирах и т.д. Они передают информацию о потреблении энергии, что позволяет скорректировать использование электроприборов во времени; распределить электричество в зависимости от потребности. В свою очередь все это позволит потребителю значительно снизить расходы на электроэнергию.

Хотя создание умных сетей – мировая тенденция, задача, стоящая перед российскими энергетиками и учеными, гораздо более сложная и многогранная. В России энергообеспечение потребителей происходит в сложных условиях экономического, технического, природно-климатического характера. Мы ориентируемся на крупные генерирующие объекты, у нас иной, по сравнению с Европой и Америкой, уровень интегрированности больших систем со значительно более высоким уровнем сложности системных взаимосвязей. Соответственно, нам потребуются перестройка всей глобальной электроэнергетической сети на принципах многофункциональной автоматизации.

Но это в перспективе, пока же внедрение «умных» сетей носит фрагментарный и по большей части экспериментальный характер. В России элементы системы Smart Grid (у нас она носит название активно-

адаптивной сети) только начинают внедряться. В конце 2009 года на подстанции «Алюминиевая» (Республика Хакасия) были введены батареи статических конденсаторов, что позволило в несколько раз повысить надежность ее работы. В 2010 году на подстанции «Выборгская» (Ленинградская область) начали эксплуатацию устройства, которое дает возможность регулировать мощность. Использование данного нововведения снизит потери электроэнергии при ее экспорте в Финляндию. В ближайшем будущем устройства такого типа появятся еще на нескольких энергостанциях, в крупных городах, что позволит снизить риски коротких замыканий, стабилизировать напряжение.

Еще одним примером использование «интеллектуальных сетей» является общемировой проект «умный город» (программа полной реконструкции и модернизации инфраструктуры города). В число его участников вошел и российский город Белгород. В нем уже действует «умное освещение», которое дает возможность контролировать энергопотребление, состояние сетей, количество работающих ламп, а также поэтапно управлять уличным освещением, то есть менять количество работающих фонарей в зависимости от условий видимости, количества людей на улице и других факторов. В ряде распределительных сетей установлены специальные устройства, помогающие с большой точностью определить в каком месте произошел разрыв проводов и отключить только небольшое количество потребителей электроэнергии. В некоторых домах имеются интеллектуальные счетчики, позволяющие получить информацию о том, сколько электроэнергии было потрачено в тот или иной период времени (например, за ночь), сколько электричества потребляет холодильник или стиральная машина, узнать об уровне напряжения в сети.

Необходимость применения технологии умных сетей диктует растущая цена на электроэнергию при росте ее потребления. Кроме того, помимо чисто экономических задач, «умные» сети способны помочь решению и экологических проблем. Ведь если вместо строительства новых электростанций будут оптимально использовать существующие мощности, то снизится и воздействие на окружающую среду. Если раньше эти вопросы относились к категории вторичных, то сейчас, хочется верить, ситуация изменилась.

Библиографический список

1. **Кобец Б.Б., Волкова И.О.** Smart Grid в электроэнергетике / Энергетическая политика. – 2009. – № 6. – С. 54 – 56.
2. **Кобец Б.Б., Волкова И.О., Окорочков В.Р.** Smart Grid как концепция инновационного развития электроэнергетики за рубежом / Энергоэксперт. – 2010. – № 2. – С. 52 – 58.
3. **Васильев И.** Умные сети – умная энергетика / Российская газета. – 2010. – № 5213 (134). – С. 11.

*К.А. Филатова, А.А. Рябинин, студенты;
рук. В.А. Мартынов, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ТРАНСФОРМАТОР ТЕСЛА

Вряд ли кому в мире неизвестно имя Николы Теслы. Ему посвящено множество ресурсов и статей, его имя окутано тайной. Его считают одним из гениев 20 века.

Он открыл переменный ток, флуоресцентный свет, беспроводную передачу энергии, построил первые электрические часы, турбину, двигатель на солнечной энергии, он предсказал возможность лечения больных током высокой частоты, появление электропечей, люминесцентных ламп, электронного микроскопа. Он автор более 800 изобретений, рассмотрим одно из них под названием «Трансформатор Тесла».

Это устройство представляет собой резонансный трансформатор, производящий напряжение высокой частоты (см. рисунок).

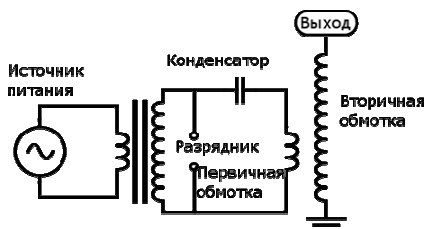


Схема трансформатора

Работу резонансного трансформатора можно объяснить на примере обыкновенных качелей. Если их раскачивать в режиме принудительных колебаний, то максимально достигаемая амплитуда будет пропорциональна прилагаемому усилию. Если раскачивать в режиме свободных, резонансных колебаний, то при усилиях равных с принудительными колебаниями, максимальная амплитуда вырастает многократно. Так и с трансформатором Тесла – в роли качелей выступает вторичный колебательный контур, а в роли прилагаемого усилия – генератор. Их согласован-

ность («подталкивание» строго в нужные моменты времени) обеспечивает первичный контур или задающий генератор (в зависимости от устройства).

Трансформатор Tesla рассматриваемой простейшей конструкции, показанной на схеме, работает в импульсном режиме. Первая фаза – это заряд конденсатора до напряжения пробоя разрядника. Вторая фаза – генерация высокочастотных колебаний. Однако описание и схема – две большие разницы хотя и схема на картинке скорее всего работоспособна хотя и разрядник «коротит» трансформатор чем вызывает как минимум малооправданную большую потребляемую мощность. Для того, чтобы схема соответствовала описанию разрядник и конденсатор необходимо поменять местами.

Tesla использовал трансформатор для генерации и распространения электрических колебаний, направленных на управление устройствами на расстоянии без проводов (телеуправление), беспроводной связи (радио), и беспроводной передачи энергии, которые все были им достигнуты. В начале столетия, трансформатор Tesla также нашел популярное использование в медицине. Пациентов обрабатывали высокочастотными токами, способными к путешествию через человеческое тело, без вреда оказывая тонизирующее и оздоравливающее влияние.

Данное устройство получило огромное распространение в культурной сфере нашей жизни.

В фильме «Ученик чародея» в одном из эпизодов демонстрируется музыкальное свойство катушек. Этот эффект достигается уменьшением и увеличением частоты.

Американская группа ARC ATTACK использует трансформаторы Tesla в качестве источника звуков. То есть разряд, создаваемый трансформатором, может звучать, «петь».

Российская команда Tesla-FX утверждает, что впервые сыграла гимн России на созданной ими музыкальном трансформаторе Tesla.

*Е.С. Шибачева, А.А. Черезова, студенты;
рук. В.А. Мартынов, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РОЛЬ ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

В последние десятилетия электроэнергетики разных стран все чаще применяют постоянный ток для решения ряда задач, в том числе связанных с передачей электрической энергии на расстояние.

Для ответа на вопрос, почему это делается, сопоставим характеристики линий переменного и постоянного тока.

1. Обе линии обладают однотипными параметрами – активным сопротивлением проводов, а также индуктивностью и емкостью.

2. Активное сопротивление проводов определяет потери мощности и энергии в линии и, следовательно, ее КПД, а индуктивность и емкость – электромагнитные процессы в линии, связанные с передачей электроэнергии.

3. Для линий переменного тока эти процессы носят волновой характер, что и определяет основные характеристики такой линии.

4. В линии постоянного тока волновые процессы отсутствуют.

5. Именно это различие и лежит в основе всех решений, связанных с применением постоянного тока для транспорта электроэнергии.

Индуктивность и емкость линии определяются ее конструкцией – расстоянием между фазами (полюсами), диаметром проводов и длиной линии. При увеличении расстояния между фазами индуктивность линии увеличивается, а емкость линии снижается. Уменьшение этого расстояния приводит к обратному эффекту. Увеличение длины линии вызывает увеличение как ее индуктивности, так и емкости.

Емкость воздушной линии переменного тока практически не влияет на передаваемую мощность, однако через нее протекает так называемый зарядный ток, который создает зарядную мощность линии и приводит к дополнительному нагреву проводов, т.е. увеличивает потери энергии в линии и снижает ее КПД. Кроме того, зарядный ток приводит к нежелательному повышению напряжения в промежуточных точках линии, поэтому возникает необходимость в компенсации зарядной мощности линии, для чего используются специальные устройства – реакторы, которые, в конечном счете, приводят к увеличению стоимости линии и снижению надежности электроустановки в целом.

В электропередачах постоянного тока отсутствуют многие факторы, свойственные электропередачам переменного тока и ограничивающие их пропускную способность. Предельная мощность, передаваемая по ЛЭП постоянного тока, имеет большие значения, чем у аналогичных ЛЭП переменного тока. При работе воздушной линии на постоянном напряжении, когда по ней протекает постоянный ток, в установившемся режиме ни ее индуктивность, ни емкость не оказывают никакого влияния на процесс передачи электрической энергии по линии и, следовательно, на максимальную мощность, которую можно передать по линии при увеличении ее длины.

Для воздушной линии переменного тока существует зависимость максимальной передаваемой мощности от ее длины – чем длиннее линия,

тем меньше предельная мощность, которую можно по ней передать. Это одна из причин, ограничивающих допустимую длину такой линии.

Воздушная линия постоянного тока не имеет такого ограничения, поэтому линия постоянного тока может иметь любую длину и передаваемую мощность, которые диктуются практической целесообразностью. Возможные ограничения – допустимые потери энергии на нагрев проводов и пропускная способность используемой аппаратуры.

Вставка постоянного тока (ВПТ) – преобразовательная подстанция, предназначенная для преобразования переменного тока в постоянный и последующего преобразования постоянного тока в переменный исходной или иной частоты.

Электропередачи и вставки постоянного тока – важнейшие элементы электрической сети, обеспечивают:

- высокую управляемость;
- исключение «слабых» межсистемных связей;
- предотвращение развития аварий (живучесть);
- высокий уровень надежности;
- объединение энергосистем с разными номинальными частотами и режимными условиями;
- противоаварийное управление;
- экологические преимущества;
- меньшая удельная стоимость воздушной и кабельной линии.

Объединение систем требует обеспечения устойчивости их совместной работы. При объединении систем связями переменного тока и возникновении аварийной ситуации в одной из систем, например короткого замыкания, отключения крупного генерирующего блока или электростанции, устойчивость совместной работы может быть нарушена, что может привести к обесточиванию целых регионов и, как следствие, большому экономическому ущербу. Этот печальный опыт имеют многие из развитых стран.

Благодаря новому оборудованию – ВПТ – на подстанции 220 кВ Могоча (Забайкальский край) обеспечена возможность параллельной работы объединенных энергосистем Сибири и Дальнего Востока, что значительно повысит надежность электроснабжения потребителей Забайкальского края, в том числе Транссибирской и Байкало-Амурской железнодорожных магистралей.

Недостатки ППТ:

- ограниченность применения ППТ связана главным образом с техническими трудностями создания эффективных недорогих устройств для преобразования переменного тока в постоянный (в начале линии) и постоянного тока в переменный (в конце линии);

- преобразовательные подстанции из-за сложного и дорогостоящего оборудования очень увеличивают стоимость передач постоянного тока;
- отбор мощности от ППТ может быть выполнен только при строительстве преобразовательной подстанции.

Выводы: из-за особого расположения России на Евро-Азиатском континенте отечественная энергосистема может стать не только крупнейшим экспортером электроэнергии, но и посредником в обмене энергопотоками для энергосистем сопредельных государств, что потребует значительного улучшения управляемости ЕЭС.

Библиографический список

1. **Повышение** энергоэффективности энергосистем путем применения вставок и передач постоянного тока / Л.Л. Балыбердин, Л.А. Кошечев, Н.Г. Лозина и др. // Электро. – 2010. – № 3. – С. 2 – 6.
2. **Калюжный А.Х.** Управление потоками мощности в электрических сетях с помощью фазоворотных трансформаторов // Электричество. – 1986. – № 11. – С. 12 – 18.
3. **Ивакин В.Н., Сысоева Н.Г., Худяков В.В.** Электропередачи и вставки постоянного тока и статические тиристорные компенсаторы. – М.: Энергоатомиздат, 1993.
4. **Бржезицкий А.В.** Вставки постоянного тока. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2011.

Н.С. Волкова, студ.;
рук. А.В. Макаров, к.т.н., доцент

50 ГЕРЦ: СТАНДАРТ ИЗ ХАОСА

Частота 50 Гц – одна из двух, используемых в качестве стандарта для поставки электроэнергии в мире. История возникновения этого стандарта частоты имеет долгий путь от создания первых систем электро-снабжения в конце XIX века до 1930 – 1950 годов, когда этот стандарт утвердился официально в единых энергосистемах Европы, Азии, Австралии, Африке и части Латинской Америки.

В конце 80-х годов 19 века термин «частота» был неизвестен, для характеристики переменного тока использовалось понятие «число оборотов в минуту» электрической генерирующей машины. В 1895 г. преподаватель London Technical College Сильванус Томпсон в одном из своих учебных пособий ввел понятие частоты: «Число периодов (циклов) в секунду, называют частотой или периодичностью циклов». Единицу измерения частоты назвали в честь физика Генриха Герца в 1930 году.

Частота первых известных промышленных установок однофазного переменного тока определялась скоростью вращения вала паровой или гидравлической турбины и находилась в диапазоне от $16\frac{2}{3}$ до $133\frac{1}{3}$ Гц. Промышленный генератор компании Вестингауз, созданный в 1886 году имел скорость 2000 об/мин, 4 пары полюсов и частоту:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = 2000 \cdot 4 / 60 = 133\frac{1}{3} \text{ Гц.}$$

В начале 90-х годов 19 века Никола Тесла, консультант фирмы Вестингауз, предложил использовать в многофазных системах электроснабжения переменного тока более низкие частоты.

В Европе законодателями мод являлись немецкие электротехнические компании. Легендарная трехфазная электропередача компании AEG, созданная в 1891 году под руководством русского инженера Михаила Доливо-Добровольского, являлась первым промышленным прототипом существующей в настоящее время системы электроснабжения и работа на частоте 40 Гц. Электроэнергия от трехфазных генераторов гидроэлектростанции Лауфен на реке Неккар (16 пар полюсов, скорость 150 об/мин, частота 40 Гц) передавалась на расстояние 175 км для питания 1000 лампочек искусственного водопада на Франкфуртской электротехнической выставке.

В 1890 году компания Maschinenfabrik Oerlicon (MFO) в Швейцарии стала использовать электропитание на частоте 50 Гц, чтобы иметь возможность получать энергию от новой гидроэлектростанции в Хохфельден, Швейцария, на расстоянии 23 км. Генератор для этой электростанции был такого же типа как и в Лауфен, но с вертикальной осью и новой скоростью 187,5 об/мин. Соответственно частота увеличилась с 40 до 50 Гц (напряжение увеличилось в той же пропорции).

В Северной Америке в 1895 году была построена первая гидроэлектростанция на Ниагарском водопаде. Огромные двухфазные гидроэлектрические генераторы переменного тока с 5000 л.с. каждый, имели 6 пар полюсов и работали со скоростью 250 об/мин на частоте 25 Гц (рис. 1).



Рис. 1

Ниагарский водопад стал образцовым для Северной Америки, большинство больших компаний соглашались на 2 частоты: 25 Гц и 60 Гц для большого количества систем общего назначения. Приблизи-

тельно к 1919 году системы на 25 Гц медленно теряли популярность в пользу систем на 60 Гц.

В 1898 году в Райнфельдене, находящимся на границе Германии и Швейцарии, была установлена первая крупномасштабная гидроэлектростанция в Европе. Она имела всего 20 гидроэлектрических единиц: половина единиц работала на постоянном токе, другая половина на переменном токе (трехфазные генераторы переменного тока и напряжения имели 44 пары полюсов и работали со скоростью 68,2 об/мин и частотой 50 Гц) для освещения промышленных предприятий и городов в обеих странах в пределах радиуса 20 км.

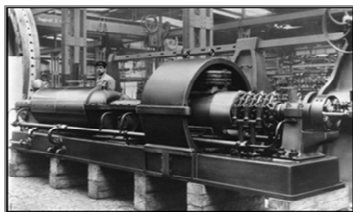


Рис. 2

В 1901 году компания Brown, Boveri & Cie (BBC) в Швейцарии стала применять первую паровую турбину с двумя полюсами, работающую со скоростью 3000 об/мин и производящую напряжение переменного тока с частотой 50 Гц (рис. 2).

Из-за беспорядка частот эксперты того времени старались найти наиболее благоприятную частоту. Выбор частоты зависел от электрической цели системы, от плотности населения, области экономики, страны и даже континента. Фактически распространение частоты 50 Гц было сложным процессом само по себе с различным уровнем беспорядка в странах. Так, например, в центральной области Лондона находилась 41 электростанция с 8 различными частотами.

Первое объединение электростанций для параллельной работы было осуществлено в Швейцарии. Две небольшие электростанции – в Глэдфельдене (120 кВ·А) и Гохфельдене (360 кВ·А) – соединились двухкилометровой линией 5 кВ и питали распределительную сеть завода фирмы «Эрликон» по линии передачи протяженностью 24 км при напряжении 13 кВ.

Есть предположение, что частота 50 Гц была выбрана в Европе, так как она является элементом в метрической «Серии привилегированных чисел», предложенной французским инженером Чарльзом Ренардом в 1870-х.

В России важным событием в период электрификации было строительство в 1897 году электростанции на переменном трехфазном токе и частоте 50 Гц на Раушской набережной, первой действительно крупной электростанции в России (рис. 3).

Соединение первых электростанций для параллельной работы явилось прообразом энергетических систем. Первое соединение для парал-

лельной работы с помощью более протяженных линий электропередачи электростанций, было осуществлено в России в 1914 г. путем объединения московских электростанций на Раушской набережной с электростанцией в Богородске, расположенной в 76 км от Москвы, под названием «Электропередача».

С начала XX века 50 Гц становятся неформальным общепринятым стандартом, иные частоты со временем были исключены. В качестве транснационального европейского стандарта он был принят после Второй мировой войны, а в 1958 году создаются первые межгосударственные электроэнергетические системы.



Рис. 3

Библиографический список

1. **Blalock T.J.** A variety of frequencies. – IEEE Power Energy Mag. – Vol. 8. – No. 4. – Pp. 75 – 88.
2. **Neidhöfer G.** 50-Hz Frequency. How the standard emerged from a European jumble. – IEEE Power Energy Mag. – Vol. 5. – No. 5. – Pp. 88 – 100.
3. **Доливо-Добровольский М.О.** Избранные труды (о трехфазном токе). – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1948.

И.А. Котов, студ.;
рук. А.В. Макаров, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТЬЮ

Двадцать первый век ознаменовался значительным переосмыслением стратегических принципов развития энергетики. На фоне развернувшегося энергетического кризиса ведутся поиски новых, экологически безопасных и экономически выгодных источников энергии. К альтернативным источникам энергии относят: энергию солнца, земли, ветра, мирового океана, движения водных потоков, а также энергию биомассы и других возобновляемых источников.

Наряду с широко разрекламированными преимуществами: практическая неисчерпаемость возобновляемых энергоресурсов, якобы минимальное воздействие на окружающую среду, снижение эмиссии окиси углерода, децентрализация электроснабжения и безопасность, малоизвестны их существенные недостатки. К ним относятся: низкая плотность энергии, и ее неравномерное распределение во времени, отсутствие возможности регулирования выдаваемой мощности для большинства энергоустановок, низкий коэффициент использования установленной мощности, необходимость аккумулирования большого количества энергии, высокая себестоимость электроэнергии и затраты на эксплуатационные расходы.

Объемы генерации электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в 2010 году достигли значения 4,5 % от всей вырабатываемой в мире электроэнергии, а установленная мощность увеличивается в среднем на 14 % в год и в настоящее время составляет более 450 ГВт с ежегодной выработкой электроэнергии около 800 ТВт·ч [1]. Во многом это связано с тем, что в большинстве стран приняты законы, создающие льготные условия, как для производителей, так и для потребителей альтернативной энергии. Основной проблемой данных источников являются их взаимодействие с существующими электроэнергетическими системами и возможность осуществления бесперебойного электроснабжения потребителей.

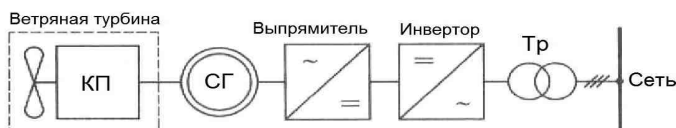
Для геотермальных и солнечных термодинамических электростанций, работающих по стандартному паротурбинному циклу с синхронными турбогенераторами, как и на традиционных тепловых станциях, не имеется трудностей при взаимодействии с сетью. Проблемой является только необходимость аккумулирования тепловой энергии на солнечных термодинамических станциях для возможности выработки электроэнергии в период отсутствия солнечного излучения.

Фотоэлектрические станции, использующие солнечные батареи для преобразования солнечного излучения непосредственно в электроэнергию, генерируют постоянный электрический ток, что требует установки специальных инвертирующих устройств, для преобразования постоянного тока в переменный трехфазный ток промышленной частоты, при этом допускается установка аккумуляторных батарей дающих возможность выдавать мощность при отсутствии солнечного света. Основной трудностью является крайняя нестабильность выходного напряжения фотоэлектрических преобразователей, которая зависит от режима их эксплуатации.

Ветроэнергетические установки (ВЭУ), работающие параллельно с сетью имеют четыре основных типа генераторов:

- 1) асинхронный генератор с постоянной скоростью вращения – имеет непосредственное включение в сеть;

- 2) асинхронный генератор с переключением числа пар полюсов и двумя статорными обмотками, со ступенчатым изменением скорости вращения – включается в сеть посредством преобразователя частоты;
- 3) асинхронизированный генератор двойного питания с переменной скоростью вращения – включается в сеть посредством преобразователя частоты;
- 4) синхронный тихоходный многополюсный генератор с переменной скоростью вращения – включается в сеть через выпрямитель и инвертор (см. рисунок).



Структурная схема подключения ВЭУ к сети с использованием устройств силовой электроники

Существенное улучшение характеристик инвертора при работе с сетью, может быть получено с применением схем, выполненных на полностью управляемых электронных ключах. В этом случае инвертор может работать, генерируя заданные значения активной и реактивной мощности. Для каждого генератора предусмотрена однофазная схема тиристорного мягкого пуска позволяющая произвести плавное включение ветрогенератора в сеть через повышающий трансформатор.

На приливных электростанциях, работающих на выдачу электроэнергии в сеть, используют обратимые гидрогенераторы, которые могут работать в насосном режиме и аккумулировать электроэнергию по принципу гидроаккумулирующих электростанций, тем самым имея возможность генерации электроэнергии в перерывах между приливами и отливами. В этом случае станция запасает энергию при «провалах» графика нагрузки, а затем использует ее для покрытия пиковых нагрузок электрической сети.

Мощные электростанции на базе ВИЭ, как правило, находятся в местах достаточно удаленных от централизованных электрических сетей, поэтому для уменьшения потерь в ЛЭП на 15 – 20 % экономически выгодно применять вставки постоянного тока, которые также обеспечивают более высокое качество электроэнергии и увеличивают надежность работы всей энергосистемы в целом. Большинство станций лишено возможности регулирования выдаваемой мощности. Одним из вариантов решения этой проблемы является разработка системы аккумулирования энергии с помощью электролиза воды и получения водорода. При «провалах» графика нагрузки энергоустановка запасает энергию в виде водорода, а затем, используя топливные элементы, или иные преобразователи энергии, осуществляет выдачу электроэнергии в сеть.

Существующие виды альтернативных источников энергии имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными источниками и со временем возможно способны составить им конкуренцию в связи с ростом цен на ископаемое топливо, однако они имеют и ряд недостатков, не позволяющих им при данном уровне развития технологий занять лидирующее место в энергетике. Наиболее рационально использовать комбинированные электростанции с взаимным применением разных видов источников энергии для возможности бесперебойного электроснабжения потребителей, регулирования выдаваемой мощности, поддержания требуемого уровня напряжения и частоты в электрической сети. Для включения альтернативных источников в структуру существующих электроэнергетических систем целесообразно создание специализированных устройств гибкой межсистемной связи, например вставки постоянного тока или установки на основе FACTS-устройств, обеспечивающих независимое ведение режимов и «развязку» по токам короткого замыкания.

Библиографический список

1. **Renewable Power Generation.** – Status Report. – 2010.
2. **Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г.** Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: учеб. пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
3. **Баранов Н.Н.** Нетрадиционные источники и методы преобразования энергии: учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

*Е.Ю. Парубец, студ.;
рук. А.В. Макаров, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

КИРХГОФ: ЗАКОНЫ И ПРАВИЛА



Густав Кирхгоф (Gustav Robert Kirchhoff), родился 12 марта 1824 года в Кенигсберге в семье советника юстиции. В Кляйнгорской гимназии, куда Густав пришел учиться, он охотнее всего занимался математикой и физикой. После окончания гимназии он поступил на физико-математический факультет Кенигсбергского университета и будучи студентом начал заниматься научной работой. В 1845 – 1847 г., исследуя электрические цепи, в почти двадцатилетнем возрасте он открыл и

сформулировал закономерности протекания тока в разветвленных электрических цепях (правила Кирхгофа). В 1857 году результаты исследований были обобщены им в статье о распространении переменного тока по проводам.

Законы Кирхгофа это соотношения, которые выполняются между токами и напряжениями в узлах и на участках любой электрической цепи. По мнению ученых-физиков законы Кирхгофа следует именовать «Правилами Кирхгофа», ибо они не отражают фундаментальных сущностей природы и не являются обобщением большого количества опытных данных, а могут быть выведены из других положений и предположений. Формально это верно, но ни один электротехник с этим не согласится. Законы Кирхгофа позволяют рассчитывать любые электрические цепи установившихся и переходных режимах, имеют универсальный характер и являются основой решения большинства задач теории электрических цепей.

Кирхгоф внес огромный вклад в физические законы оптики, исследуя связи между процессами испускания и поглощения света. Совместно со своим коллегой, известным химиком Робертом Вильгельмом Бунзеном были проведены уникальные эксперименты, которые положили начало целой области прикладных исследований – спектральному анализу.

«Закон излучения» Кирхгофа в современной формулировке звучит следующим образом: «Отношение излучательной способности любого тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел при данной температуре для данной частоты и не зависит от их формы и химической природы».

Вклад Густава Роберта Кирхгофа в области электротехники невозможно переоценить. Законы (правила) Кирхгофа способствовали достижению одной из главных задач электротехники – возможности расчета электрических цепей постоянного и переменного тока и являются фундаментальными законами в теории электрических цепей.

Библиографический список

1. **Физическая** энциклопедия. – Т. 2. – М.: Большая Российская Энциклопедия, 1980.
2. www.peoples.ru/science/physics/robert_kirchhoff.

Содержание

Секция 12. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

<i>Шиков А.В., Новоселов Е.М.; рук. Скоробогатов А.А.</i> Обзор современных функциональных методов контроля состояния асинхронных электродвигателей	3
<i>Вахрин М.В., Сецрелин Д.А.; рук. Рассказчиков А.В.</i> Анализ конструктивного выполнения элегазового оборудования	7
<i>Гуревич Е.Д.; рук. Лапшин В.М.</i> Проблемы практической реализации проекта АЭС-2006 при развитии атомной энергетики России	10
<i>Линев Д.С., Третьяков А.В.; рук. Калачева О.Н.</i> Система контроля увлажнения изоляции и ее применение на генераторах типа ТЗВ	13
<i>Ильичев А.Ю., Новоселов Е.М.; рук. Скоробогатов А.А.</i> Разработка метода измерения скольжения по гармоникам внешнего магнитного поля	17
<i>Страхов А.С., рук. Калачева О.Н.</i> Разработка модели сети 6 (10) кВ для исследования влияния способа заземления нейтрали на работу сети в режимах замыкания на землю	21
<i>Кряжев А.С.; рук. Савельев В.А.</i> Анализ потерь в распределительных сетях и мероприятия по их снижению	26
<i>Рыжов А.С., рук. Савельев В.А.</i> Мониторинг уровня частичных разрядов в изоляции электрооборудования	29
<i>Чистов В.Ю.; рук. Лапшин В.М.</i> Варианты расширения действующих ТЭЦ газотурбинными и парогазовыми установками	32
<i>Яховских А.С., Литвинов С.Н.; рук. Савельев В.А.</i> Разработка лабораторного стенда «Диагностика витковых замыканий в обмотке статора асинхронного электродвигателя»	35
<i>Тузов П.Ю.; рук. Шакарян Ю.Г.</i> АСГТ как средство повышения эксплуатационных характеристик агрегатов ГАЭС	38
<i>Глотова Н.В.; рук. Савельев В.А.</i> Методический подход к очередности технического перевооружения электрооборудования	47

Секция 13. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

<i>Варзина А.А.; рук. Бушуева О.А.</i> Мероприятия по снижению потерь электроэнергии в магистральных электрических сетях	52
<i>Емелин Д.В., Дудин Д.А.; рук. Аржанникова А.Е.</i> Апробация нового программного комплекса расчета электромеханических процессов в ЭЭС WinSSS при выполнении лабораторной работы по исследованию статической устойчивости простейшей ЭЭС	55
<i>Москвин И.А.; рук. Слышалов В.К.</i> Параллельная реализация уравнений Горева–Парка	57
<i>Макеев А.О.; рук. Панков Б.В.</i> Оценка надежности воздушных линий электропередач напряжением 110 – 500 кВ	59
<i>Сабитов А.Х.; Низамутдинов Б.Р.; рук. Козлов В.К.</i> Контроль и мониторинг изоляционной системы силовых трансформаторов	63
<i>Биккниева Ю.К.; рук. Козлов В.К.</i> Исследование процесса старения трансформаторного масла методом спектроскопии в УФ и видимом диапазоне	66
<i>Моисеева Е.В.; рук. Моисеева Т.Ю., Плотников И.А.</i> Децентрализованное снабжение потребителей при совмещении дизельной и ветряной электростанций	67
<i>Вуколов В.Ю.</i> Организация системы мониторинга уровня энергетической эффективности	72

<i>Вуколов В.Ю.; рук. Татаров Е.И., Шарыгин М.В.</i> Особенности расчета НТПЭ для промышленных предприятий, передающих электроэнергию субабонентам	76
<i>Шагиудлин А.В., Рыбакова А.В.; рук. Грачева Е.И.</i> Моделирование законов надежности низковольтных аппаратов на основе статистической информации	80
<i>Агафонов А.Н.</i> Анализ существующих и перспективных методов удаления гололеда на ВЛ напряжением 110 кВ и выше без отключения ВЛ	83

Секция 14. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

<i>Филатова Г.А.; рук. Шуин В.А., Лебедев В.Д.</i> О подходах к моделированию трансформаторов тока нулевой последовательности	86
<i>Винокурова Т.Ю.; рук. Шуин В.А., Шагурина Е.С.</i> Модель компенсированной сети 6 – 10 кВ для исследования режимов функционирования защит от замыканий на землю на основе высших гармоник	92
<i>Иванов И.Е.; рук. Мурзин А.Ю.</i> Разработка нового лабораторного практикума по синхронизации генератора с сетью и управлению напряжением на выводах генератора	99
<i>Иванов И.Е.; рук. Мурзин А.Ю.</i> Определение актуальных параметров воздушных ЛЭП по данным двустороннего замера токов и напряжений	102
<i>Мурзина Е.А.; рук. Шуин В.А.</i> Расчет перенапряжений при замыканиях на землю в сетях 6 – 10 кВ с изолированной нейтралью	107
<i>Семущкин А.А.; рук. Фомичев А.А.</i> Разработка емкостного датчика присутствия человека автоматики освещения	116
<i>Вотякова Е.М., Гнатюк Б.А.; рук. Фролова О.В.</i> Разработка программы лабораторной работы «Решение задачи линейного программирования симплекс-методом»	119
<i>Токарев С.Ю.; рук. Лебедев В.Д.</i> Пригодность измерительных трансформаторов для регистрации электромагнитных волновых процессов в многопроводных системах	123
<i>Кокоулин Д.Н.; рук. Шуин В.А.</i> Исследование работы пусковых органов релейной защиты, основанных на использовании аварийных составляющих токов, при синхронных качаниях	126

Секция 15. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

<i>Юрмов И.М.; рук. Чекан Г.В.</i> Оценка надежности участка системы электроснабжения промышленного предприятия	132
<i>Кучин П.Г., Рагуткин А.В.; рук. Кудрин Б.И.</i> Алгоритм управления системами электроснабжения ответственных потребителей с несколькими источниками	135
<i>Марков Ю.В.; рук. Кудрин Б.И.</i> Пути развития промышленного электроремонта в условиях рыночной экономики	137
<i>Шакиров А.Н.; рук. Грачева Е.И.</i> Исследование погрешностей методов расчета потерь электроэнергии в сетях промышленного электроснабжения	140
<i>Мишина В.В.; рук. Киушкина В.Р.</i> Эффективность реализации стратегии выбора вариантов энергоснабжения в энергетике Республики Саха (Якутия)	142
<i>Малеева Е.И.; рук. Буянина Н.С.</i> Четырехфазные линии электропередач в сетях с изолированной нейтралью	146
<i>Назаралтева П.Б.; рук. Киушкина В.Р.</i> Построение структурно-топологической динамики в математическом пакете Matlab как инструмент исследований в энергетике	149
<i>Шишаев И.А.; рук. Рагуткин А.В.</i> Разработка источников бесперебойного питания с применением суперконденсатора в качестве накопителя электрической энергии	153
<i>Коняев Д.А.; рук. Гамазин С.И.</i> Особенности энергопотребления прибора учета	156

Секция 16. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

<i>Зайцев Е.С.; рук. Лебедев В.Д.</i> Разработка и анализ математических моделей расчета переходных процессов в тепловом поле сечения высоковольтной кабельной линии с изоляцией из шитого полиэтилена	160
<i>Долгих И.Ю.; рук. Гречухин В.Н., Лебедев В.Д.</i> Анализ способов и принципов измерения тока для создания цифровых измерительных трансформаторов	167
<i>Токарев С.Ю.; рук. Лебедев В.Д.</i> Применение обратного преобразования Лапласа для расчета переходных волновых процессов в многопроводных системах	171
<i>Козина Ю.И.; рук. Сайкин М.С.</i> Технологические требования к производству вакуумной стали	173
<i>Карачев В.Д.; рук. Голубев А.Н., Мартынов В.А.</i> Многофазный синхронный электропривод	176
<i>Снитько И.С.; рук. Мартынов В.А.</i> Применение математической модели динамических электромагнитных процессов в измерительных трансформаторах	179
<i>Огурцов К.Н., Дунаева Т.Ю.; рук. Архангельский С.Ю.</i> Математическое моделирование процесса СВЧ дефростации мерзлых грунтов	185
<i>Недавидов Е.Г.; рук. Топоров А.В., Киселев В.В., Топорова Е.А.</i> Разработка комбинированных магнитоэлектрических уплотнений пожарных насосов	188
<i>Брыкалов П.С., Гуцин В.А., Долгих И.Ю.; рук. Лебедев В.Д.</i> Разработка физической модели канальной печи для лабораторных работ по курсу «Электротехнологические установки и системы»	191
<i>Кукушкин Д.А., Иванова Н.П.; рук. Нуруллин Р.Г.</i> Импульсный фотостимулятор для тренировки зрения	193
<i>Москичева Д.М., Медведев А.Б., Киселев К.Н.; рук. Шеманаева Л.И.</i> Управление освещением помещения	195
<i>Корнев С.А.; рук. Шахин В.А., Осипов В.А.</i> Повышение достоверности результатов тепловизионной диагностики электрооборудования при энергоаудите	198
<i>Дятлова Е.А., Сулютина Е.А.; рук. Гречухин В.Н., Лебедев В.Д.</i> Традиционные и современные ТТ и ТН для подстанций 110 – 750 кВ	199
<i>Новикова С.С.; рук. Сайкин М.С.</i> Численное исследование влияния конструкций магнитопроводов магнитоэлектрических герметизаторов на параметры магнитного поля в рабочем зазоре	202
<i>Демиденко О.В.; рук. Сайкин М.С.</i> Влияние технологических факторов на перепад давлений агнитоэлектрических герметизаторов	205
<i>Баженов С.; рук. Сайкин М.С.</i> Разработка и исследование магнитоэлектрического герметизатора камеры вакуумной сварки	207
<i>Алейников А.В.; рук. Мартынов В.А., Голубев А.Н.</i> К расчету динамических процессов синхронных многофазных вентильных двигателей	210
<i>Шукин Е.А., Крайнов Р.А., Левин В.И.; рук. Лебедев В.Д.</i> Разработка математической модели трансформатора в программе Comsol Multiphysics для исследования динамических процессов	213
<i>Токарев С.Ю.; рук. Лебедев В.Д.</i> Применение обратного преобразования Лапласа для расчета переходных волновых процессов в многопроводных системах	216
<i>Корнилов К.Е.; рук. Макаров А.В.</i> Феррорезонансные явления в электрических сетях	218
Секция 16А. ИСТОРИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
<i>Смирнов А.С., Тюкова М.А.; рук. Королева И.М.</i> «Электрогедест» Бенардоса	222
<i>Кокорева Ю.М., Бахит А.Л., Громова Н.В.; рук. Мартынов В.А.</i> «Гимн неподвижности»	225
<i>Дугина А.А.; рук. Сайкин М.С.</i> История развития асинхронного двигателя	226

Заякина А.А.; рук. Сайкин М.С. История создания и применения магнитных жидкостей в технике	229
Куколкина К.А.; рук. Сайкин М.С. Монорельсовый транспорт – перспективы развития . .	231
Ильченко И.С.; рук. Сайкин М.С. Нетрадиционные источники энергии	233
Катрунцева А.А.; рук. Сайкин М.С. Трамвай. История развития	235
Костерин В.С., Замыслов И.Д.; рук. Сайкин М.С. История развития троллейбусов . .	238
Константинова С.А.; рук. Сайкин М.С. Шаровая молния – уникальное явление природы. Гипотезы. Загадки	240
Екимова В.М.; рук. Сайкин М.С. Умные сети. Перспективы развития в России	243
Филатова К.А., Рябинин А.А.; рук. Мартынов В.А. Трансформатор Тесла	246
Шибачева Е.С., Черезова А.А.; рук. Мартынов В.А. Роль вставки постоянного тока в современной электроэнергетике	247
Волкова Н.С.; рук. Макаров А.В. 50 Герц: Стандарт из хаоса	250
Котов И.А.; рук. Макаров А.В. Альтернативные источники энергии и их взаимодействие с электрической сетью	253
Парубец Е.Ю.; рук. Макаров А.В. Кирхгоф: законы и правила	256

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

«ЭНЕРГИЯ-2012»

РЕГИОНАЛЬНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ (С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ)

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ Том 3

*Составитель Макаров А.В.
Компьютерная верстка Фомичевой А.В.
Печатается в авторской редакции*

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.
Подписано в печать 15.05.2012. Формат 60x84 1/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,35.
Тираж 100 экз. Заказ № .
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический
университет им. В.И. Ленина»
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.