

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ТРАНСФОРМАТОР

Багаев К.И. – магистрант гр.8Э-21, Грибанов А.А. – к.т.н., доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Распределительные трансформаторы мощностью 25-630 кВА напряжением 6-10 кВ - наиболее массовая серия производимых и эксплуатируемых трансформаторов в нашей стране и за рубежом. Общее количество распределительных трансформаторов в России составляет более чем 3 млн. шт. Ежегодное потребление электроэнергии в России находится на уровне 1000 миллиардов кВт·ч, при этом общие потери электроэнергии в распределительных трансформаторах оцениваются в 75 млрд. кВт·ч.

При передаче энергии из первичной обмотки во вторичную возникают электрические потери мощности. Потери в трансформаторе можно разделить на потери холостого хода  $P_0$  - это потери, которые присутствуют в трансформаторе, подключенном к сети, всегда независимо от загрузки, и потери короткого замыкания  $P_k$  - это потери, зависящие от загрузки трансформатора. В общих потерях электроэнергии  $P_k$  и  $P_0$  участвуют одинаково. По европейскому стандарту EN 50464-1:2007 выделяются классы энергопотребления трансформаторов, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Классы энергопотребления трансформаторов

Номинальная мощность трансформатора, кВА	Потери, Вт										Ук, %
	Класс E		Класс D		Класс C		Класс B		Класс A		
	$P_0$	$P_k$	$P_0$	$P_k$	$P_0$	$P_k$	$P_0$	$P_k$	$P_0$	$P_k$	
100	320	2516	260	2150	210	1750	180	1475	145	1250	4
КПД,% (загрузка 100 %)	97,24		97,65		98,08		98,37		98,62		4
160	460	3627	375	3100	300	2350	260	2000	210	1700	4
КПД,% (загрузка 100 %)	97,51		97,87		98,37		98,61		98,82		4
250	650	4914	530	4200	425	3250	360	2750	300	2350	4
КПД,% (загрузка 100 %)	97,82		98,14		98,55		98,77		98,95		4
400	930	7020	750	6000	610	4600	520	3850	430	3250	4
КПД,% (загрузка 100 %)	98,05		98,34		98,71		98,92		99,09		4
630	1200	10179	940	8700	800	6750	680	5600	560	4800	6
КПД,% (загрузка 100 %)	98,23		98,49		98,82		99,01		99,16		6
1000	1700	15210	1400	13000	1100	10500	940	9000	770	7600	6
КПД,% (загрузка 100 %)	98,34		98,58		98,85		99,02		99,17		6

В современных условиях снижение затрат на производство и эксплуатацию распределительных трансформаторов - основная задача изготовителей. В настоящее время в России и странах СНГ серийно выпускаются трансформаторы с классом потерь D и энергосберегающие трансформаторы классом потерь C. Трансформаторы, стоящие на вооружении у сетевых компаний и потребителей, подходят только к классу потерь E. Лучшие международные производители приступили к производству трансформаторов с классом потерь A. Рассмотрим возможность изготовления и преимущества трансформаторов с потерями A/2. Уменьшение потерь  $P_0$  связано с изменением конструкции и материала магнитопровода. Наиболее перспективный путь снижения затрат на производство и эксплуатацию силовых распределительных трансформаторов — это применение магнитопровода из аморфных (на-

нокристаллических) сплавов. Это вещества с характерным строением, которое близко к структуре расплавленного металла или стекла. Благодаря характерной структуре аморфные металлы обладают рядом особых свойств: они становятся в несколько раз прочнее, значительно улучшаются электромагнитные свойства, повышается стойкость к коррозии. В противоположность обычным стеклам они проявляют заметную пластичность. Эти вещества обеспечивают более чем пятикратное снижение потерь холостого хода по сравнению с трансформатором с магнитопроводом из холоднокатаной электротехнической стали. Аморфные ленты изготавливаются при охлаждении расплава со скоростью  $10^6$  °C/с на быстровращающемся охлаждаемом барабане (рисунок 1).

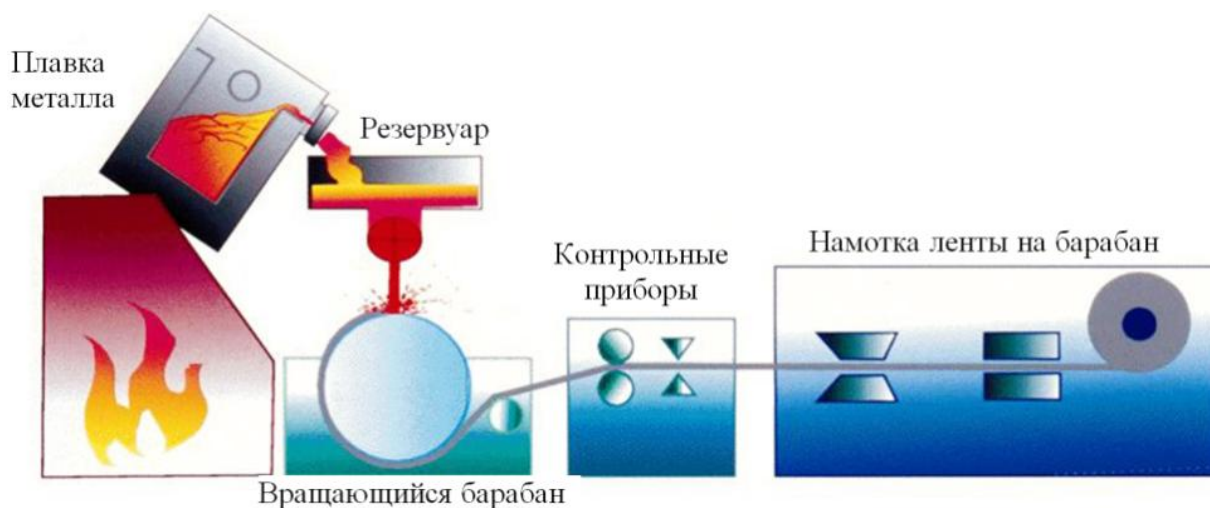


Рисунок 1 – Схема установки для получения аморфных лент

Уменьшение мощности потерь короткого замыкания  $P_k$  (потери в обмотках) — это инновации в конструкции обмоток силового трансформатора. В первую очередь нужно использовать фольговую обмотку (рисунок 2). Фольговая обмотка — фольговые обмотки выполняются из широкого медного или алюминиевого листа толщиной от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров. Это позволит увеличить сечение и уменьшить габариты обмотки НН, что в свою очередь позволит уменьшить длину провода ВН. Кроме того, обмотки из фольги обладают определёнными преимуществами: улучшается охлаждение обмотки благодаря более равномерному распределению температуры по всему сечению катушки; уменьшаются осевые усилия при К.З., так как обеспечивается сбалансированность МДС обмоток по высоте.



Рисунок 2 – Обмотка с алюминиевой лентой

Сравним КПД различных трансформаторов одной распространенной мощностью 250кВА. Коэффициент полезного действия характеризует эффективность преобразования напряжения в трансформаторе. Коэффициент полезного действия трансформатора определяется отношением мощности P2, отдаваемой трансформатором в нагрузку, к мощности P1, потребляемой из сети:  $\eta = P2 / P1$ . Для сравнения выберем 4 типа трансформатора массово производимых в России – это серийные и энергосберегающие, самый экономичный трансформатор по европейскому стандарту – это трансформатор энергопотребления класса А и проектируемый трансформатор. Сравнение будем производить для различных коэффициентов загрузки. Результаты сравнения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение КПД трансформаторов

Коэффициент загрузки	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Отдаваемая мощность, кВт	250	225	200	175	150	125	100	75	50	25
Серийные трансформаторы производимые в России										
R <sub>хх</sub> , Вт	540	540	540	540	540	540	540	540	540	540
R <sub>кз</sub> , Вт	3700	2997	2368	1813	1332	925	592	333	148	37
Потребляемая мощность, кВт	254,2	228,5	202,9	177,4	151,9	126,5	101,1	75,9	50,7	25,6
КПД	98,33	98,45	98,57	98,67	98,77	98,84	98,88	98,85	98,64	97,74
Энергосберегающие трансформаторы производимые в России										
R <sub>хх</sub> , Вт	425	425	425	425	425	425	425	425	425	425
R <sub>кз</sub> , Вт	3250	2632,5	2080	1592,5	1170	812,5	520	292,5	130	32,5
Потребляемая мощность, кВт	253,68	231,59	205,41	179,37	153,47	127,70	102,08	76,59	51,24	26,03
КПД	98,55	97,15	97,36	97,56	97,74	97,88	97,97	97,92	97,57	96,03
Трансформатор энергопотребления класса А										
R <sub>хх</sub> , Вт	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
R <sub>кз</sub> , Вт	2350	1903,5	1504	1151,5	846	587,5	376	211,5	94	23,5
Потребляемая мощность, кВт	252,65	227,20	201,80	176,45	151,15	125,89	100,68	75,51	50,39	25,32
КПД	98,95	99,03	99,11	99,18	99,24	99,30	99,33	99,32	99,22	98,72
Проектируемый трансформатор										
R <sub>хх</sub> , Вт	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
R <sub>кз</sub> , Вт	1200	972	768	588	432	300	192	108	48	12
Потребляемая мощность, кВт	251,35	226,12	200,92	175,74	150,58	125,45	100,34	75,26	50,20	25,16
КПД	99,46	99,50	99,54	99,58	99,61	99,64	99,66	99,66	99,61	99,36

Из таблицы мы видим, что зависимость КПД трансформатора от нагрузки не линейна. Для понимания полной картины построим диаграмму зависимости КПД от коэффициента загрузки (рисунок 3).

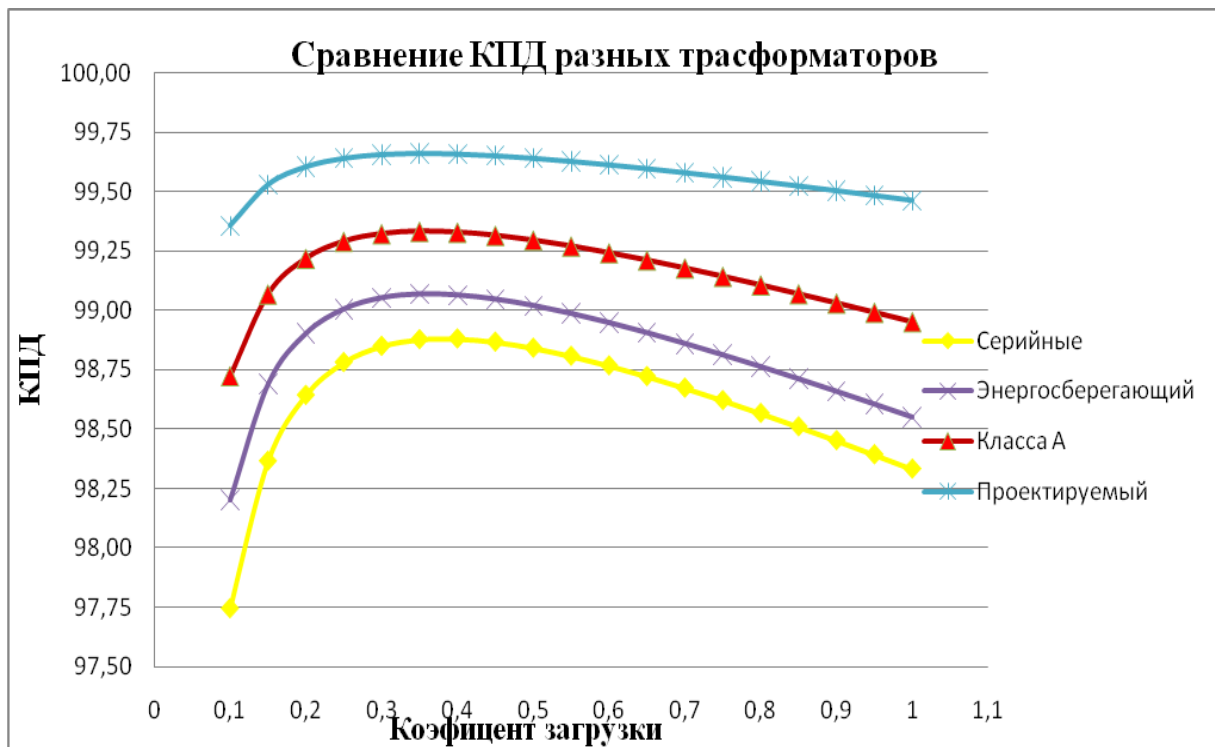


Рисунок 3 – Сравнение КПД трансформаторов

Из рисунка хорошо видно, что максимальное КПД достигается при загрузки 30-40%. Преимущество проектируемого трансформатора над серийными составляет около 1%. Характеристика проектируемого трансформатора более линейна это значит что проектируемы трансформатор обладает низкими и при минимальной загрузке и при перегрузке. Обладая, тем самым, преимуществом по сравнению с аналогами.

### ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗА СЧЕТ УСТРАНЕНИЯ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

Березина Н.А., Черных И.С. – студенты гр. Э-82, Попов А.Н. – к.т.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Прогресс в промышленном производстве неразрывно связан с увеличением его энерго-насыщенности. Тем не менее, самые совершенные технологические процессы очень чувстви- тельны к качеству электроэнергии, необходимой для их осуществления.

За возрастающей чувствительностью сложных электронных систем управления и кон- троля, высокой ценой изготовления и эксплуатации скрывается их незащищенность к изме- нениям напряжения питающей сети или к ее кратковременным отключениям. Следствие это- го - сбой в работе оборудования, выпуск бракованной продукции, серьезные финансовые по- тери [1].

Проанализировав статистику остановок технологического оборудования, мы можем вы- делить основные причины выхода его из строя (рисунок 1):

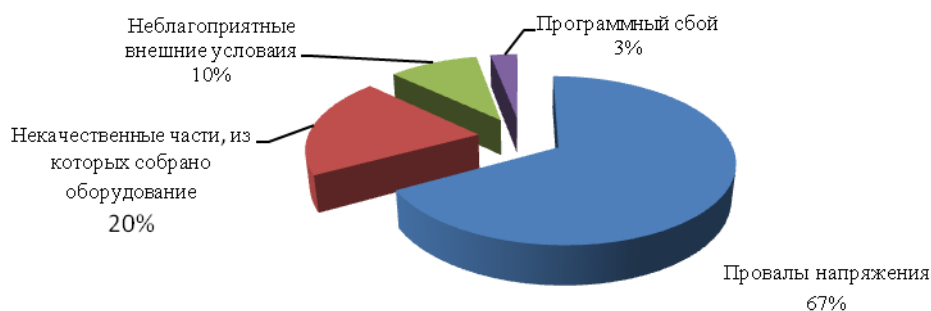


Рисунок 1 – Причины выхода из строя оборудования

Данные статистического анализа говорят о том, что провалы напряжения являются неотъемлемой частью существующих систем электроснабжения. Провалы напряжения оказывают особо ощутимое влияние на непрерывные производственные процессы на химических, нефтеперерабатывающих, машиностроительных и других предприятиях со сложной технологической цепочкой выпуска продукции, где для останова и возобновления процесса требуется от нескольких часов до нескольких суток [1].

В современных условиях, когда кратковременные нарушения электроснабжения (КНЭ) предприятий приобретают массовые масштабы, решение проблемы надежности электроснабжения возложено на самих потребителей электроэнергии. Работа низковольтных электродвигателей приводов маслонасосов, вентиляторов и аналогичных механизмов, включенных в технологические защиты техпроцессов, микропроцессорной техники, систем телекоммуникаций, АСУ производственным процессом, стандартных блоков цифровых технологий и интернета часто подвергаются короткими по продолжительности провалами питающего напряжения, которые происходят 20-30 раз в год. Это приводит к дорогостоящему экономическому ущербу, даже если их длительность составляет миллисекунды [2].

В качестве примера рассмотрим статистику провалов напряжения на ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» (ОЭМК):

- 45,45 % однофазных провалов напряжения глубиной 9,4-00 % и длительностью 48-46 мс;
- 18,2 % двухфазных провалов напряжения глубиной 8,4-29,50 % и длительностью 72-84 мс;
- 36,35 % трехфазных провалов напряжения глубиной 13 -77,6 % и длительностью 78-203 мс.

Результаты исследований провалов напряжений в системе электроснабжения ОЭМК показали, что:

- глубина и длительность провала напряжения по фазам различна для одного и того же аварийного режима;
- при пуске высоковольтных СД наблюдаются провалы напряжения глубиной до 11,9 % и длительностью до 3,8 с;
- при пуске высоковольтных ЭД провалы напряжения глубиной до 10,7 % и длительностью до 3,5 с;
- при пуске электродвигателей, наблюдаются провалы напряжения глубиной до 12,3 % и длительностью до 5,1 с.

Статистика регистрации аварийных событий за период с августа 2004 г. по август 2007 г. свидетельствует о том, что в год имеет место от 10 до 14 провалов напряжения, вызванных 3-фазными КЗ глубиной от 11,2 % до 77,6 % и длительностью 135-К200 мс. Отключение потребителей и систем управления происходит при провалах напряжения глубиной свыше 20 % [2].

Выбор технических решений, минимизирующих последствия провалов напряжения (ПН), должен основываться на расчете экономического ущерба, обусловленного ПН для данной технологической установки или производственного процесса [3].

При проведении анализа существующих средств было выявлено, что в большинстве случаев устройства либо слишком дороги, либо не решают поставленных задач. Поэтому нами были разработаны принципы работы нового устройства для устранения и минимизации провалов напряжения.

Рассмотрим структурную схему разрабатываемого устройства, представленную на рисунке 2.

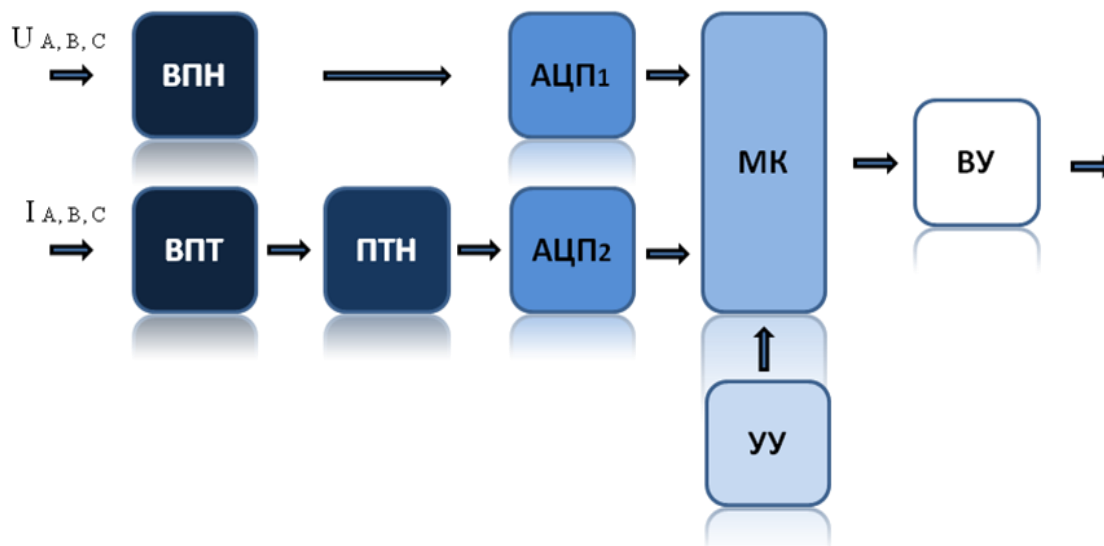


Рисунок 2 – Структурная схема устройства устранения провалов напряжения

Напряжение подается на входной преобразователь напряжения (ВПН), где масштабируется. Далее напряжение подается на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП<sub>1</sub>), который преобразует сигнал в цифровую форму для дальнейшей передачи на микроконтроллер (МК). Работа МК основана на сравнении подаваемого напряжения с нормальным. Определение нормального напряжения основывается на выявлении реактивной мощности в сети, для этого необходимо определить наличие сдвига фаз -  $\cos \varphi$ . Подаем ток на входной преобразователь тока, который масштабирует и передает его на преобразователь тока в напряжение. Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП<sub>2</sub>) переводит напряжение в цифровую форму и передает на МК.

В свою очередь, МК производит сравнение подаваемых данных и определяет наличие реактивной мощности в сети. При наличии реактивной мощности в сети управляющее устройство (УУ) подает сигнал на выходное устройство (ВУ) на подключение конденсаторной батареи для приведения напряжения к требуемому качеству. Если после подключения, напряжение не соответствует нормированным показателям электрической энергии, то происходит подключение батарей до приведения напряжения к номинальному уровню, либо пока не закончится лимит батарей.

Внедрение разрабатываемого устройства предназначено для компенсации изменений напряжения в промышленности, оно позволит значительно сократить случаи аварийных остановов электрооборудования. Устройство позволит устранить провалы напряжения и обеспечить ответственных потребителей электроэнергией требуемого качества, что сократит экономические потери из-за перерасхода сырья, брака, повреждения оборудования и недоотпуска продукции. Данное устройство может применяться в существующих системах электропитания без кардинальных изменений конструкции сети.



#### Список использованных источников

1. Пупин, В.М. Устройства защиты от провалов напряжения [Текст] / В.М. Пупин // Приложение к журналу Энергетик – 2011. – №5.
2. Пупин, В. М. Новые технологии защиты электрооборудования от нарушения в питающих сетях [Текст] / В.М. Пупин // Энергетик – 2011 – № 12.
3. Фишман, В.С. Провалы напряжения в сетях промышленных предприятий [Текст] / В.С. Фишман // Новости электротехники – 2004. – №5.
4. Фишман, В.С. Провалы напряжения в сетях промпредприятий. Причины и влияние на электрооборудование // Новости ЭлектроТехники – 2004. – № 6.
5. Шпиганович, А.Н. Провалы напряжения в высоковольтных электрических сетях [Текст] / А.Н. Шпиганович, И.А. Черных, И.Г. Шилов // Вести высших учебных заведений Черноземья – 2006. – №2.
6. Карташев, И.И. Провалы напряжения. Реальность прогнозов и схемные решения защиты // Новости ЭлектроТехники – 2004. – № 5.

### ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ТУРИСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ГЕЛИОДИЗЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Блинов Н.А., Вольченко А.И. – студенты гр. Э-92, Грибанов А.А. – к.т.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

С каждым годом запасы органических полезных ископаемых постепенно истощаются, что заставляет людей использовать альтернативные источники энергии: солнечной, ветровой, океанической, геотермальной и других.

Сейчас в России за счёт нетрадиционных источников получают всего 1% энергии. В Алтайском крае этот показатель ещё меньше. Несмотря на то, что энергосистема Алтайского края в целом работает устойчиво, обеспечивая энергоснабжение потребителей, энергетическая безопасность в энергетической стратегии Алтайского края на период до 2020 года оценивается как предкризисная. На сегодняшний момент энергосистема Алтайского края имеет дефицит собственной мощности: 60% общей потребности. Соответственно 40% электроэнергии край покупает у других регионов. Во-вторых, основной проблемой функционирования генерирующих мощностей Алтайского края является высокая степень морального и физического износа основных фондов электростанций, которая достигает 70%. Поэтому использование альтернативных источников энергии для питания отдалённых потребителей или для автономного питания важных категорий потребителей представляется довольно разумным применением возобновляемых источников энергии.

Гелиоэнергетика в условиях нашего региона является перспективным направлением развития, поскольку интенсивность солнечного излучения и количество солнечных дней в среднем по году сравнимы с аналогичными показателями южных регионов нашей страны, особенно в степных районах края.

Основной задачей рассматриваемой работы является создание проекта электроснабжения базы отдыха, так как Алтайский край является одним из регионов России с развитой туристической направленностью. Основным источником электропитания базы отдыха, географически расположенной в климатических условиях Алтайского края, будут являться солнечные батареи. Комплекс будет состоять из главного здания управления, 8 домиков для отдыхающих, здания кафе с минимальным набором электроприёмников, бани, электротехнического помещения, подсобного помещения, футбольного поля и освещаемого теннисного корта. Солнечные панели будут располагаться на открытой территории рядом с базой отдыха таким образом, чтобы, с учётом механизма поворота панелей и датчиков слежения за положением солнца, обеспечивался наибольший коэффициент полезного действия панелей, выработывалась наибольшая мощность. Всё остальное оборудование, а именно аккумуляторные батареи, инвертор, контроллеры разряда и ряд других сопутствующих устройств будут

располагаться в электротехническом помещении. Доступ к нему, а также к территории с солнечными панелями будет ограничен для отдыхающих и не электротехнического персонала. Освещение по периметру базы и внутри помещений будет энергосберегающим, как и электроприборы, используемые на базе отдыха, с целью достижения наибольшей эффективности использования электроэнергии. Также будет организовано резервное питание посредством дизель-генераторов.

Стратегическое направление развития возобновляемых источников энергии имеет хороший потенциал в Алтайском крае и принесет экономический эффект, который позволит снизить зависимость от энергии соседних регионов, повысить надёжность энергоснабжения удалённых потребителей.

## КАБЕЛИ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Водова Р.В. – студент гр. Э-82, Капустин С.Д. – к.т.н., доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Мировые тенденции развития кабельных энергораспределительных сетей среднего напряжения в течение последних десятилетий направлены на внедрение кабелей с теплостойкой экструдированной изоляцией (сшитый полиэтилен и этилен-пропиленовая резина) и замену ими кабелей с бумажной пропитанной изоляцией. В настоящее время в промышленно развитых странах Европы и Америки практически 100% рынка силовых кабелей занимают кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Цель: более широкое внедрение в производство кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Задачи: рассмотреть достоинства кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена предназначены для передачи и распределения электрической энергии в стационарных установках на номинальное переменное напряжение 10, 20, 35 кВ частотой 50 Гц в сетях с изолированной и заземленной нейтралью. Климатическое исполнение – УХЛ, категория размещения 1, 2 по ГОСТ 15150Q69, включая прокладку в земле и в воде.

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена обладают рядом преимуществ перед кабелями с бумажной пропитанной изоляцией:

- повышенная рабочая температура, что позволяет увеличить пропускную способность;
- повышенная стойкость при работе в условиях перегрузок и коротких замыканий;
- возможность прокладки на трассах с неограниченной разностью уровней;
- не содержат масла, битума, свинца, что упрощает монтаж, эксплуатацию и устраняет экологически неблагоприятные факторы;
- более надёжны в эксплуатации и требуют меньших расходов на реконструкцию и содержание кабельных линий;
- меньший вес и допустимый радиус изгиба;
- возможность изготовления кабелей большой строительной длины;
- одножильные и трехжильные кабели с оболочкой из полиэтилена.

Повышенная термическая и механическая стойкость сшитого полиэтилена обусловлена созданием новых молекулярных связей в процессе вулканизации ("сшивки") изоляции. [1]

В начальной стадии обработки термопластичный полиэтилен имеет серьезные недостатки, основным из которых это ухудшение механических свойств, при нагреве до температуры плавления материала.

Есть несколько технологий сшивания термопластичных материалов. Для кабелей до 1 кВ используется самый распространенный способ – сшивание через привитые органофункциональные группы, в качестве таких групп используют силаны. Этот способ еще называют силанольная сшивка. Сшивание полиэтилена происходит с использованием пара или воды, температура которых достигает 80-90 °С. Под воздействием влаги, тепла и применением ка-



тализатора, совершается гидролиз силанольных групп и, как следствие, сшивка материала.

Для того чтобы сшить изоляцию кабелей на напряжение 10 – 35 кВ применяется другой способ – сшивание с использованием пероксидов. Этот процесс, в отличие от силанольной сшивки, происходит в сухой среде, а именно в среде инертного газа (азота), при воздействии высоких температур от 300 до 400 °С и давления в 8 – 12 атм., при этом сохраняются электрические характеристики высоковольтных кабелей.[2]

Отдельно хотелось бы сказать об испытаниях кабелей. В настоящее время распространён способ проверки кабелей повышенным напряжением. Но есть более щадящий способ – испытания напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц.

В качестве примера можно рассмотреть замену кабелей ААБл в цехе точной металлообработки на кабели СПЭ АПвБбШп. Кабели СПЭ дороже не более, чем на 60%, по сравнению с кабелями с БПИ. Однако за счет высокой электрической прочности изоляции, невысокой повреждаемости, длительному сроку службы, а значит сокращением затрат на обслуживание кабельной линии, экономия может составить около 800 000 рублей.

Выводы: несмотря на сложную технологию производства, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена находят всё более и более широкое применение. Отечественные производители начинают применять такие кабели при строительстве новых и реконструкции старых линий.

#### Список использованных источников

1. RusCable.Ru [электронный журнал]. Режим доступа: <http://www.ruscable.ru/info/cable/cross-linked/sevcable/sk1.html>
2. Энергетика [электронный журнал]. Режим доступа: <http://forca.ru/stati/kabeli/kabeli-s-izolyaciey-iz-sshitogo-polietilena.html>
3. «РСК «Город» / Официальный сайт компании. Режим доступа: <http://www.gorod812.com/articles/ispytaniya-skl>
4. Локус / Официальный сайт компании. Режим доступа: <http://locus.ru/library/cable/897/page/4/>

## ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАКУУМ-ИМПУЛЬСНОЙ СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Гарагуля Р.В., Теников А.В. – студенты гр. Э-81, Грибанов А.А. – к.т.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Как известно, изоляция трансформатора является ответственной частью его конструкции, так как надёжность работы трансформатора определяется в основном надёжностью его изоляции. Поэтому электроизоляционная система должна выдерживать без повреждений электрические, тепловые, механические и физико-химические воздействия, которым она подвергается при эксплуатации трансформатора. Одним из главных параметров при оценке качества изоляции является содержание в ней влаги, которая абсорбируется из внешней среды при длительном пребывании изоляции на открытом воздухе во время её транспортировки и хранения, а также при монтаже и ремонте трансформаторов, и оказывает негативное влияние на её электрическую прочность.

Количественная оценка влажности изоляции осуществляется с помощью электровлагомеров, принцип действия которых основан на зависимости электрического сопротивления изоляции от её влажности. Гарантию отсутствия излишней влаги в твёрдой изоляции трансформаторов даст её сушка.

Сравнив имеющиеся достоинства и недостатки различных способов сушки твёрдой изоляции трансформаторов, было решено остановиться на вакуум-импульсном способе сушки и на его основе установить возможность улучшения всех необходимых показателей, придя на смену классической камерной сушке.

Так как изоляция трансформаторов имеет волокнистое строение, то очень большое внимание требуется уделить выбору режима сушки, чтобы повысить качество изоляции, исключив риск её коробления и растрескивания в процессе сушки.

Содержание влаги характеризуют отношением её массы в изоляции к общей массе изоляции. Это отношение, выраженное в процентах, и называют влажностью:

$$W = \frac{m_e}{m_0} \cdot 100 = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $W$  – влажность изоляции;  $m_e$  – масса воды;  $m$  – масса влажной изоляции;  $m_0$  – масса абсолютно сухой изоляции.

Сушка твердой изоляции включает следующие процессы:

- влагообмен — испарение влаги из образца в окружающую среду;
- влагоперенос — перемещение влаги внутри образца.

Для сушки необходимо, чтобы происходили оба процесса. Влага от внутренних, сердцевинных слоёв должна идти к поверхности (влагоперенос) и удаляться с поверхности (влагообмен). При этом важно, чтобы процессы влагообмена и влагопереноса были по интенсивности одинаковыми. Если количество воды, удаляемой с поверхности, будет больше, чем с внутренних слоёв, то и усыхание поверхностных слоёв будет больше. В результате будет создаваться напряжение между внутренними и внешними слоями, которое может привести к деформации изоляции и даже к трещинам и разрушениям.

При искусственной сушке изоляции перед конструкторами оборудования сушильных камер стоят три главные задачи:

- а) обеспечить качество сушки, т.е. минимизировать брак от деформаций и трещин;
- б) уменьшить время сушки насколько это возможно;
- в) сократить потребление энергии (энергоемкость).

Вакуумная сушка – это сушка при пониженном давлении в специальных герметичных камерах. Из-за невозможности получения низкой конечной влажности изоляции вакуумная сушка самостоятельного значения не имеет. Применяют её в комбинации с другими методами сушки.

В свою очередь вакуумная сушка подразделяется на камерную вакуумную сушку и вакуум-импульсную сушку.

Камерная вакуумная сушка происходит в герметичных камерах при постоянном давлении ниже атмосферного. Механизм сушки аналогичен камерной.

Вакуум-импульсная сушка основана на быстром импульсном воздействии изменения давления в вакууме. Для интенсификации процесса массопередачи определяющую роль играют скорость создания вакуума в сушильной камере и его величина.

Основные преимущества – это низкая энергоёмкость, малая длительность процесса сушки, а отсюда и высокая производительность; обеспечение высокого качества сушки материала.

Для периода постоянной скорости сушки характерен внутренний тепломассоперенос, который в упрощенном виде может быть описан уравнением

$$-\frac{\partial \omega}{\partial x} = k(\omega - \omega_p), \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент сушки, зависящий от режима сушки;  $\omega_p$  – равновесное влагосодержание;

$$k = \frac{N}{\omega_{кп} - \omega_p} = \chi \cdot N, \quad (3)$$

где  $\chi$  – коэффициент, зависящий от свойств материала и его влажности;  $\omega_{кп} = 1/\chi + \omega_p$  – приведённое критическое влагосодержание;  $N$  – скорость сушки.

Путём интегрирования (2) можно получить следующую экспоненциальную зависимость

$$\frac{\omega - \omega_p}{\omega_{к.п} - \omega_p} = \exp(-k \cdot \tau) = \exp(\chi \cdot N \cdot \tau) \quad (4)$$

Как видно из приведённых выражений, скорость сушки определяется градиентом текущего и равновесного влагосодержания.

Общая продолжительность процесса сушки

$$\tau = \frac{1}{N} \left[ (\omega_0 - \omega_{к_1}) + \frac{2,3}{\chi_1} \lg \chi_1 (\omega_{к_1} - \omega_{к_2}) + \frac{2,3}{\chi_2} \lg \frac{\omega_{к_2} - \omega_p}{\omega - \omega_p} \right] \quad (5)$$

При увеличении температуры предварительной сушки со 110 – 120 до 130 – 140 °С продолжительность сушки может быть сокращена с 8 до 4 ч. Однако температура сушки для каждого типа изоляции должна быть ограничена в зависимости от её нагрево- и теплостойкости во избежание ускоренного старения и деформации. В свою очередь, вакуумная сушка позволяет значительно ускорить процесс удаления влаги из изоляции, поэтому при ней температура сушки может быть снижена на 20 – 30°С по сравнению с сушкой при атмосферном давлении.

Аналитическая задача, устанавливающая связь между временными и пространственными изменениями потенциалов переноса при сушке влажных капиллярно-пористых материалов, формулируется на основе системы дифференциальных уравнений молярно-молекулярного теплопереноса, являющейся математической моделью процессов переноса при сушке.

Качество сушки изоляционного материала непосредственным образом сказывается на параметрах диэлектрика и определяет надёжность трансформатора, а также безопасность при его работе. Основной задачей является модернизация технологии сушки изоляции и переход к экономически выгодным и технически совершенным способам сушки. Также необходимо ускорить процесс сушки, при этом сохранив надлежащее качество изоляции. Преимущество вакуум-импульсной сушки изоляции трансформаторов перед классической требует опытного подтверждения, что и будет являться основной задачей экспериментальных исследований.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВОЛНОВЫХ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Грицынов А.А., Маликов И.В. – студенты гр. Э-81, Грибанов А.А. – к.т.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Трёхфазный асинхронный двигатель является одним из основных электроприёмников на предприятиях различных отраслей экономики нашей страны. К сожалению, до настоящего времени несмотря на простоту конструкции электродвигателей их надёжность остаётся недостаточно высокой. Недостаточная надёжность электрических машин переменного тока, наблюдаемая на практике, приводит к большим сверхнормативным расходам на преждевременные ремонты и внеплановые простои оборудования. Это связано с воздействием на узлы электродвигателя внешних и внутренних неблагоприятных факторов. Как показывают результаты исследований, наиболее сильное воздействие оказывают эти факторы в случае их действия не поодиночке, а совместно, что очень часто наблюдается в реальных условиях эксплуатации.

Воздействие этих факторов на электродвигатель приводит к его выходу из строя. Результаты статистических исследований позволили установить распределение доли количества выходов из строя по отдельным узлам электродвигателей. В большинстве случаев наблюдается выход из строя обмотки статора. При этом основными видами повреждений обмотки статора являются пробой или разрушение межвитковой изоляции, замыкание между обмотками и замыкание обмоток на корпус.

Для уменьшения воздействия негативных факторов и обеспечения работоспособности

электродвигателей используется ряд способов повышения надёжности их работы. Безусловно, значительных результатов можно добиться только в том случае, если проводить работы и исследования по совершенствованию всех способов повышения надёжности электродвигателя. В нашей работе основное внимание уделено совершенствованию методик диагностики асинхронных двигателей.

В настоящее время для диагностики асинхронных двигателей получили распространение методы, которые условно можно разделить на методы комплексной функциональной диагностики, позволяющие оценивать состояние электродвигателя во время работы, и тестовые методы диагностики, которые, как правило, используются для оценки состояния отдельных узлов. Функциональные методы обладают большим потенциалом, но довольно сложны в реализации. Тестовые методы более просты по своей физической сути, но достоверность диагностической информации при их использовании в большинстве случаев невысока.

Одним из методов тестовой диагностики, отличающимся высокой достоверностью информации о состоянии обмотки, является метод волновых затухающих колебаний. Его суть состоит в подаче на один из выводов обмотки прямоугольных импульсов напряжения и фиксации на другом выводе волнового затухающего колебательного процесса. Для эффективного использования данного метода предложены различные формы диагностического параметра. Этим решалась одна и та же проблема – обеспечение сравнимости результатов диагностики путём использования одного обобщающего диагностического параметра. Такой подход позволяет судить о техническом состоянии обмотки, но не позволяет делать вывод о виде дефектов и степени их развития. Поэтому актуальным является использование новых подходов для повышения информативности диагностики.

Поскольку тестовый сигнал является периодическим, то для его полноценного анализа целесообразно использовать современные методы, в частности, спектральный анализ на основе преобразования Фурье. В результате сформулирована гипотеза, утверждающая, что изменения амплитуд в частотном спектре волновых затухающих колебаний являются результатом развития дефектов изоляции. Целью работы является необходимость подтвердить или опровергнуть эту гипотезу.

Для достижения поставленной цели был выполнен анализ и выбор математического аппарата для использования для разложения диагностического сигнала в спектр. Смысл разложения периодической функции в ряд Фурье состоит в том, что периодическая функция может быть представлена в виде суммы ряда гармонических составляющих. Для формирования этого ряда используется быстрое преобразование Фурье, которое является частным случаем дискретного преобразования Фурье, широко используемого в современных программно-аппаратных системах.

Для проведения экспериментальных исследований было выбрано следующее оборудование: цифровой осциллограф АК ИП-4107/3, сочетающий в себе функции генератора тестовых сигналов и осциллографа с анализатором спектра, имеющий соединение с помощью USB-интерфейса с персональным компьютером или ноутбуком, и группа исследуемых электродвигателей. Цифровой осциллограф совместно с персональным компьютером и программным обеспечением образуют аппаратно-программную систему обработки диагностической информации.

На первом этапе экспериментов исследовалась зависимость спектрального состава диагностического сигнала от межвиткового сопротивления. Для проведения этого эксперимента выполнено электрическое соединение дополнительных проводников с проводниками обмотки, лежащими в одном пазу статора. Сопротивление цепи дополнительных проводников изменялось с помощью реостата. В случае, когда реостат замыкался накоротко с помощью шунта, то моделируется режим, близкий к межвитковому замыканию (рисунок 1), также моделировали режим, близкий к межобмоточному замыканию (рисунок 2). Эксперименты показали, что ухудшение свойств межвитковой изоляции приводит к наблюдаемым изменениям на частотах 21000 Гц, 27000 Гц и 31000 Гц.

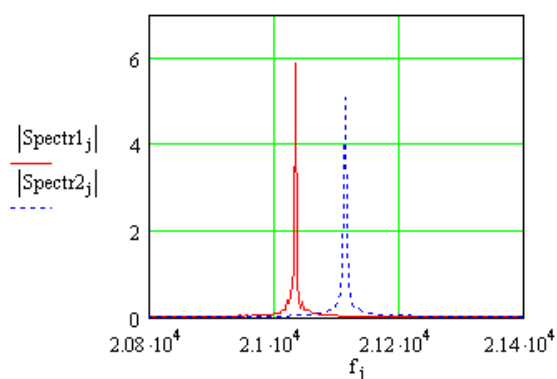


Рисунок 1 – Изменения спектрального состава, характерные для межвитковых замыканий (диагностический параметр – частота 21000 Гц).

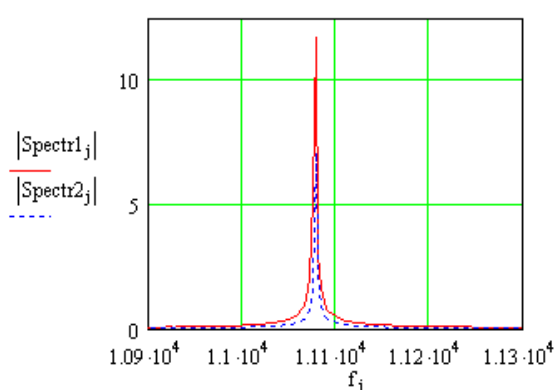


Рисунок 2 – Изменения спектрального состава, характерные для межобмоточных замыканий (диагностический параметр – частота 11000 Гц).

Можно заметить, что ухудшение свойств межвитковой изоляции приводит к некоторому увеличению выделенных диагностических частот и одновременному уменьшению их амплитуды.

Аналогично предыдущему случаю моделировалось ухудшение свойств изоляции между обмотками. В результате выделены диагностические частоты 11075 Гц, 13095 Гц, 15110 Гц, 17120 Гц и 19120 Гц. В отличие от предыдущего случая значение диагностической частоты не изменяется, но, как и в предыдущем случае, уменьшается её амплитуда.

Помимо этого моделировался режим замыкания витка на корпус двигателя. На рисунке представлено отличие эталонного состояния (рисунок 3) от моделируемого дефекта (рисунок 4).

Одной из распространённых причин ухудшения свойств изоляции электродвигателя является её увлажнение. Для определения диагностических частот увлажнения изоляции проводилось заполнение пор водой с различным её количеством. В результате эксперимента установлено, что при сильном увлажнении наблюдается рост частот во всём диапазоне спектра с уменьшением амплитуды.

Поскольку на практике возможно проведение измерений в различных температурных условиях, то дополнительно были проведены исследования влияния изменения температуры на спектральный состав диагностического сигнала. Экспериментально установлено, что с ростом температуры частоты незначительно растут во всём диапазоне спектра, но при этом увеличиваются амплитудные значения для этих диагностических частот.

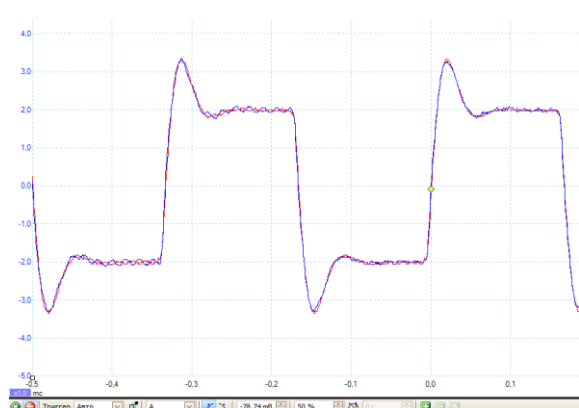


Рисунок 3 – Осциллограмма, характерная для условно-идеального состояния изоляции (эталонный вид).

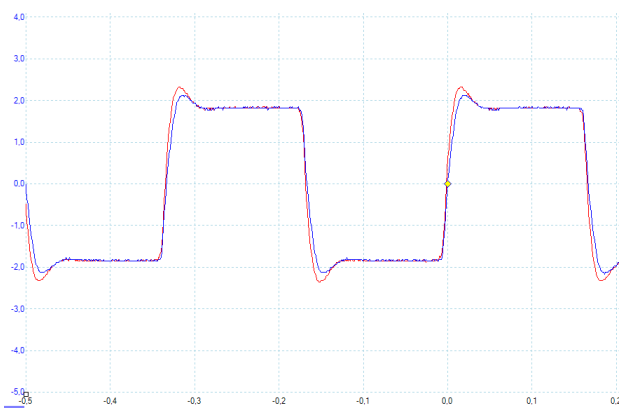


Рисунок 4 – Осциллограмма, характерная для замыкания витка на корпус (при моделировании дефекта).

Таким образом, в результате проведённых исследований доказана целесообразность ис-

пользования программно-аппаратных диагностических комплексов на основе ноутбука и цифрового осциллографа, а также выделены основные диагностические частоты, по которым можно сделать вывод о роде дефектов обмотки асинхронного двигателя и ориентировочно оценить степень их развития.

## УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Дубинин В.В., Прозорова А. А. – студенты гр. Э-81, Попов А. Н. – к.т.н., доцент Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Постановлением Правительства РФ №1013 от 13.08.1997 г. электроэнергия признана видом товара, который характеризуется качеством. Под качеством электроэнергии понимается множество технических параметров (частота основной гармоники, спектральный состав тока и напряжения, отклонение напряжения от номинала и т.д.), на основании которых вычисляются показатели качества электроэнергии.

Если качество электроэнергии не соответствует параметрам, определенным в ГОСТ 13109-97, могут возникать сбои в работе оборудования, снижаться экономические показатели работы энергосистемы [1].

Как показывают исследования, нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения далеко не всегда соблюдаются. Это приводит к неоптимальным режимам работы и даже к повреждениям элементов систем электроснабжения и приёмников электроэнергии, а также к увеличению потерь энергии. Поэтому в настоящее время весьма актуальной является проблема контроля и поддержания (регулирования) качества электроэнергии [2]. На рисунке 1 показана статистика нарушений показателей качества электроэнергии по данным ОАО "МРСК Сибири" "АлтайЭнерго" за 2012 г.

Несмотря на то, что при генерации электроэнергии напряжение имеет классическую синусоидальную форму, к тому моменту, когда оно достигает конечного потребителя, его качество заметно ухудшается. В большинстве случаев это провалы напряжения и колебания частоты, которые могут привести к выходу из строя электроприемников[3].

В связи с этим, необходим комплексный контроль качества электроэнергии. Научная новизна данной работы заключается в разработке системы обработки сигналов на базе современных технологий, т.е. создание алгоритма обработки сигналов датчиков в масштабе реального времени, обеспечивающего достоверность, повторяемость и высокую точность измерений независимо от параметров анализируемого сигнала.

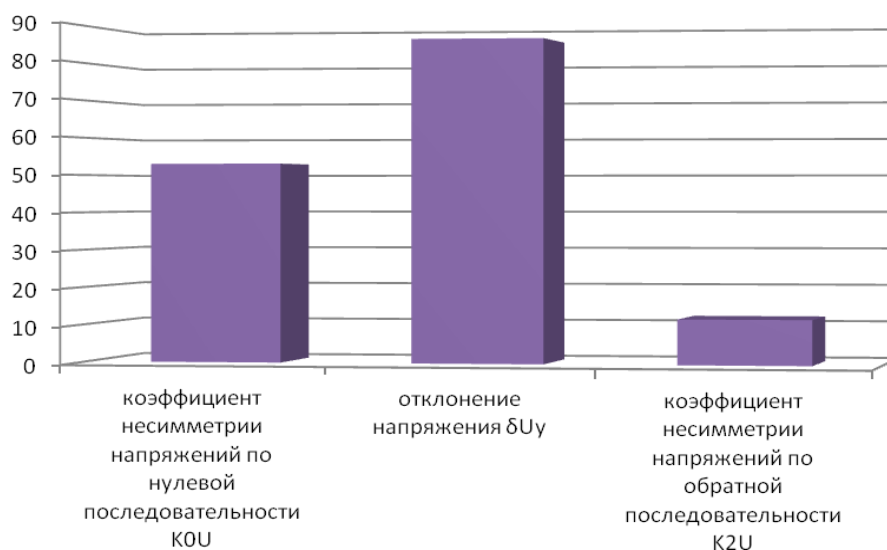


Рисунок 1 - Статистика нарушений показателей качества электроэнергии

Целью работы является разработка устройства позволяющего потребителю самостоятельно производить контроль качества электроэнергии, осуществляя мониторинг напряжения и частоты в сетях до 1000 В.

На рисунке 2 представлена структурная схема устройства контроля показателей качества электроэнергии.

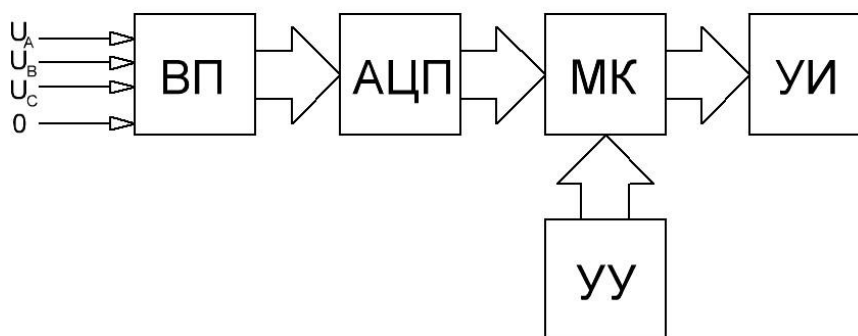


Рисунок 2 - Структурная схема устройства контроля показателей качества электроэнергии

ВП (входной преобразователь) осуществляет преобразование фазных напряжений 0,38 кВ в эквивалентно смасштабированные три синусоидально меняющихся напряжения для фаз А, В и С соответственно. АЦП (аналогово-цифровой преобразователь) осуществляет преобразование плавно изменяющихся и поступающих от блока ВП в их цифровой эквивалент. МК (микроконтроллер) на основании поступающих от блока АЦП мгновенное значение фазового напряжения осуществляет вычисления действующего значения фазного напряжения, частоты сетевого напряжения, коэффициента несинусоидальности и коэффициента несимметрии. Так же МК осуществляет вычисление и накопление статистики о показателях качества электроэнергии (максимальное и минимальное напряжение за период, максимальная и минимальная частота и т.д.). УУ (устройство управления) управляет режимами работы устройства, позволяя оператору выбрать те показатели качества электроэнергии, которые будут отображаться на УИ (устройство индикации).

Задачи:

- проанализировать текущую ситуацию в области обеспечения надежности электропитания потребителей электроэнергией;
- исследовать известные методы контроля качества электроэнергии;
- обосновать необходимость применения прибора диагностики качества электроэнергии;
- проанализировать имеющиеся устройства регистрации параметров качества электроэнергии с выявлением их достоинств и недостатков;
- доказать целесообразность разработки нового устройства.

Отличительными чертами разрабатываемого устройства от аналогов является, как представляется, более низкая себестоимость (оценочно в 2 раза), более простая процедура поверки, более простая процедура монтажа, демонтажа, лучшие эксплуатационные характеристики (точность и достоверность измерений).

Список использованных источников

1. Гамазин С.И., Петрович В.А., Никифорова В.Н. Качество электроэнергии. Определение фактического вклада потребителя в искажение параметров качества электрической энергии //Промышленная энергетика №1, 2003 — с. 32-38



2. Соколов В.С., Созыкин А.А., Коровкин Р.В., Шейко П.А., Левиков В.В., Дидик Ю.И. Актуальные вопросы мониторинга качества электрической энергии //Технологии ЭМС, №1, 2002 с. 61-68

3. Григорьев О., Петухов В., Соколов В., Красилов И. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ //Новости ЭлектроТехники №1 (19) 2003 — с. 54-55

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМП ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА

Карнаухов В.А. – магистрант гр. 8Э-21, Белицын И.В. – к.п.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Электроустановки высокого напряжения, которые включают в себя воздушные линии электропередач (ВЛЭП) высокого и сверхвысокого напряжения (свыше 220 кВ) являются источником электромагнитного поля (ЭМП).

Электромагнитное поле ВЛЭП стало важным экологическим, социальным и техническим фактором [1], требующим всестороннего изучения. Поэтому цель современных исследований может быть сформулирована как всестороннее изучение явлений, связанных с появлением временных изменений и пространственной структурой ЭМП создаваемое ВЛЭП, с их экспериментальной проверкой, для разработки объективных и достоверных критериев влияния ЭМП на окружающую среду и технические объекты.

Для исследования любого сложного процесса, технической системы (объекта исследования) можно использовать методологию исследования на основе системного подхода, которая схематично представлена на рисунке 1.

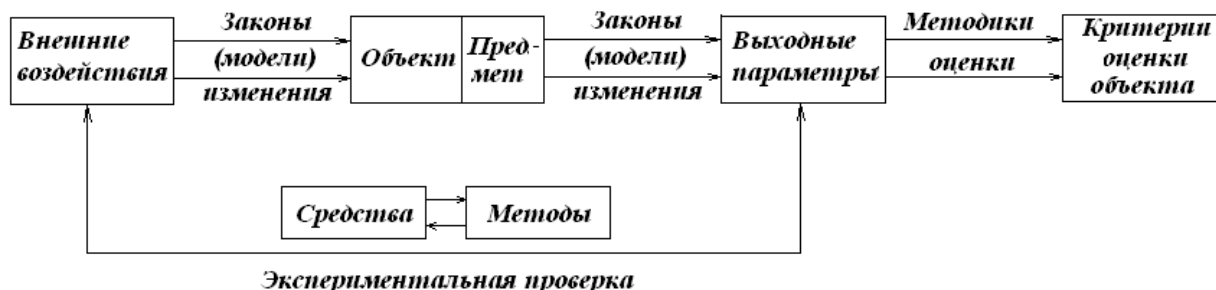


Рисунок 1 - Общая методология исследования

В нашем случае объектом исследования электроустановки высокого напряжения, а предметом исследования электромагнитное поле создаваемое ВЛЭП. Выходными параметрами является характеристики эллиптически поляризованного электрического и магнитного поля, а именно, действующие и максимальные значения напряженностей электрического и магнитного поля, как за один период колебания тока промышленной частоты, так и вдоль большей полуоси эллипса поляризации, а также коэффициент поляризации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить широкий круг задач. Первостепенной задачей является разработка моделей, методики, алгоритма определения выходных параметров ЭМП ВЛЭП, которая максимально точно учитывала особенности электроустановок высокого напряжения. Они могут разрабатываться безотносительно к внешним воздействиям [2], но взаимосвязь внешних воздействий с компонентами ВЛЭП должны быть установлены заранее, тогда когда еще не известны конкретные конструктивные решения электроустановки.

Теория расчетов стационарных ЭМП, к которым может быть отнесено исследуемое ЭМП, электроустановок различными методами подробно рассмотрены в работах Колечицкого Е.С., Меликова Н.А., Филиппова А.А., Тозони О.В., Демирчана К.С., Abou-Seada M.S. и Nasser E., Silvester P. и Chari M., а так же других авторов. В настоящее время вопросы, свя-

занные с расчетами электромагнитного поля высоковольтных электрических установок промышленной частоты и высокочастотного электрического поля коронного разряда, в частности ВЛЭП, рассмотрены в работах Ю.М. Сподобаева и В.Н.Довбыша.

На основе метода конечных элементов и метода зеркальных изображений для решения данной задачи был разработан детерминированный метод и алгоритм определения параметров электромагнитного поля, создаваемого ВЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения [3]. В предложенном методе учитывается влияние металлических элементов опор, грозозащитных тросов, а как же стрелы провеса провода.

Анализ литературных данных и собственные измерения показали, что напряженность электрического поля может значительно изменяться для одного и того же пролета в зависимости от времени года. Таким образом, для наиболее полного и точного решения вопросов связанных с проектированием, моделированием работы электроустановок необходимо решить задачу разработки моделей, которые как можно более точно определяют воздействия внешних факторов, влияющих на выходные параметры ЭМП создаваемое ВЛЭП.

Например, В.Н.Довбышем и Ю.М. Сподобаевым, в частности были получены зависимости напряженности электрического поля короны в стационарном режиме от конкретных сочетаний климатических параметров (хорошая погода; дождь, включая мокрый снег и изморозь; сухой снег; иней и наледь на проводах). Для определения магнитного поля использовались типовые графики нагрузки ВЛЭП, однако применение типовых графиков связано с рядом трудностей:

- во первых, возможны значительные отклонения от типовых графиков, это связано и изменением структуры и объема электропотребления;
- во вторых, создание базы данных типовых графиков требует длительного анализа токовых нагрузок значительного числа ВЛЭП различного класса напряжений в зависимости от типа и вида, питаемых объектах, а также их режимов работы.

Поэтому для более точных расчетов, моделирования и прогнозирования электромагнитной обстановки вблизи широкого класса излучающих технических средств – электрических установок необходима модель прогнозирования электрических нагрузок имеющий вероятностный характер.

В общем случае модели и законы изменения внешних воздействий также могут быть найдены независимо от конкретной электроустановки, на которую они воздействуют. Согласно разработанной классификации внешних воздействий на электроустановки [4], часть из них носит вероятностный характер (метеорологические характеристики и нагрузочные электрические характеристики). Исходя из этого, возникает необходимость в определении моделей и законов распределения случайных величин и процессов, которыми и являются эта часть. Для метеорологических характеристик как было показано в [4] можно использовать модели на основе статистических распределений Джонсона или Пирсона, поскольку имеется большой объем метеонаблюдений.

Для создания моделей нагрузочных электрических характеристик такой подход не является оптимальным из-за недостаточной глубины данных о токовых нагрузках электрических сетей. Динамическое стохастическое моделирование позволяет осуществлять прогноз на перспективу до 5 - 7 лет. Существующие в настоящее время методы прогнозирования временных рядов могут использоваться для прогнозирования энергопотребления, однако наибольшей точностью обладают G-методы, их точность в большой мере зависит от исходных данных.

Одним из G методов является сингулярный спектральный анализ. В его основе лежит трансформация ряда в матрицу и ее сингулярное разложение. После идентификации компонент сингулярного разложения происходит их группировка, приводящая к разложению исходного ряда на аддитивные компоненты, такие как тренд, колебания (периодики) и шум. В зарубежной литературе метод наиболее известен под названием SSA (Singular Spectrum Analysis), он возник из теории динамических систем. В России метод получил название «Гусеница» и первоначально был основан на статистических аналогиях с методом главных компонент.

Для того чтобы можно было использовать метод «Гусеница»-SSA для моделирования электрической нагрузки с максимальной эффективностью необходимо привести его краткий алгоритм. Рассмотрим вещественнозначный временной ряд  $F_N = (f_0, \dots, f_{N-1})$  длины  $N$ ,  $N > 2$ .

Алгоритм можно разбить на две части: первая часть - вложение, сингулярное разложение; вторая - группировка и диагональное усреднение. Первые часть в совокупности называются разложением, вторая – восстановлением. Основным параметром алгоритма служит так называемая длина окна  $L$ ,  $1 < L < N$ . Результатом является разбиение временного ряда на аддитивные составляющие.

Разложение. Первый шаг, вложение, состоит в формировании из ряда траекторной матрицы  $\mathbf{X}$  размером  $L \times K$ ,  $K = N - L + 1$ , следующим образом. Будем последовательно брать из ряда отрезки длины  $L$  и составим из них траекторную матрицу  $\mathbf{X} = [X_1 : \dots : X_K]$ , где  $X_j = (f_{j-1}, \dots, f_{j+L-2})^T$ . Далее проводится сингулярное разложение матрицы  $\mathbf{X}$ :

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \dots + \mathbf{X}_d, \quad \mathbf{X}_i = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T,$$

где  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_d > 0$  – упорядоченные ненулевые собственные числа матрицы  $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ ,  $\{U_i\}_{i=1}^d : U_i \in \mathbf{R}^L$  – соответствующие им собственные вектора, а  $\{V_i\}_{i=1}^d : V_i = \lambda_i^{-1/2} \mathbf{X}^T U_i \in \mathbf{R}^K$  будем называть факторными векторами.

Восстановление. На третьем шаге проводится группировка компонент разложения. Разбив  $\{1, \dots, d\}$  на  $m$  непересекающихся подмножеств  $I_j$ , получим

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{I_1} + \mathbf{X}_{I_2} + \dots + \mathbf{X}_{I_m}, \quad \mathbf{X}_{I_j} = \sum_{k \in I_j} \mathbf{X}_k.$$

Последним шагом является восстановление рядов  $F_N^{(j)}$  по сгруппированным матрицам  $\mathbf{X}_{I_j}$ . Элемент ряда  $f_n^{(j)}$  получается с помощью усреднения вдоль антидиагонали элементов матрицы  $\mathbf{X}_{I_j}$  с индексами  $a$  и  $b$  такими, что  $a + b = n + 2$ . Таким образом, получаем разбиение ряда

$$F_N = F_N^{(1)} + \dots + F_N^{(m)}.$$

Самым неформализуемым шагом является шаг группировки. Вся информация о каждой из компонент  $\mathbf{X}_i$  содержится в собственном числе  $\lambda_i$ , а также в собственном  $U_i$  и факторном  $V_i$  векторах. Собственный и факторный вектора называют сингулярными векторами, а совокупность  $(\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i)$  – собственной тройкой.

Соответственно для того, чтобы выделить какую-то составляющую ряда или отделить сигнал от шума, необходимо найти соответствующие искомым составляющей компоненты разложения, сгруппировать их и восстановлением получить искомым ряд. Условия, при которых такое разложение и выделение возможно, а также принципы и теоретические постулаты, на которые опирается идентификация, описаны в работах [5]. Таким образом, одним из основных параметров алгоритма влияющих на точность прогноза является длина окна.

#### Список использованных источников

1. Александров Г. Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды / Г. Н. Александров. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – 360 с.
2. Белицын И.В., Компанец Б.С., Старухин Р.С. Метод расчета параметров эллиптических полей для выполнения требований нормативных документов. Наука и молодежь 2007: Материалы IV всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. – С. 45-47.
3. Белицын И.В., Макаров А.В. Влияние стрелы провеса провода воздушной линии электропередач на параметры ЭМП // Известия Томского политехнического университета 2008.

– № 4. С. 56-60

4. Хомутов О.И., Белицын И.В. Вероятностный подход к факторам, влияющим на работу электроустановок, на примере ВЛЭП и ЭД // Ползуновский вестник 2007- № 4. С. 215-223.

5. Голяндина Н.Э. Метод “Гусеница”-SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 76 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СИНГУЛЯРНОГО АНАЛИЗА

Карнаухов В.А. – магистрант гр. 8Э-21, Белицын И.В. – к.п.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Для возможности использования метода SSA для прогнозирования энергопотребления и выработки рекомендаций для его использования показаны результаты прогнозирования электропотребления для одной из точек поставки электрической энергии ОАО «Городская электрическая сеть г. Барнаула». Данные о почасовом потреблении электроэнергии приведены для января месяца 2012 года представлены на рисунке 1.

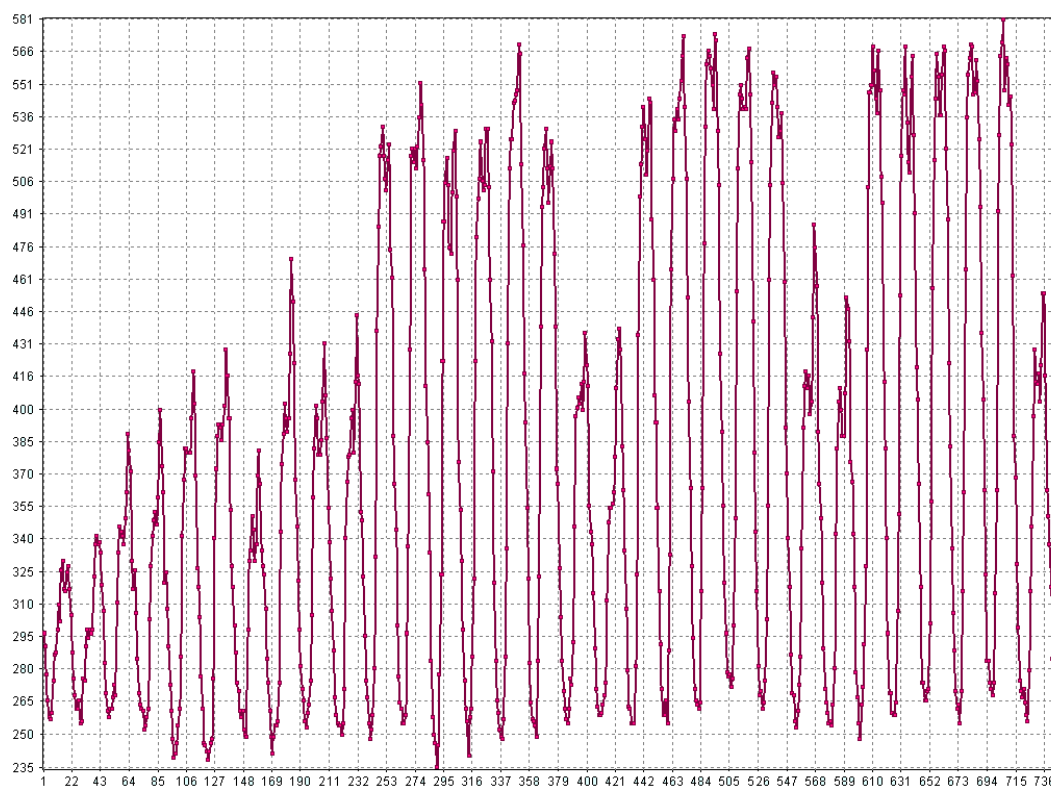


Рисунок 1 – Почасовое потребление электроэнергии за январь 2012 года

Как было показано выше, большое значение при применении метода спектрального сингулярного анализа играет длина окна. Априорно мы знаем о циклическом изменении потребляемой электрической энергии в течение суток, поэтому для дальнейшего анализа были выбраны следующие длины окна и количество главных компонент:

- для варианта I - 12 (соответствует половине суточного цикла), 10;
- для варианта II - 24 (соответствует суточному циклу), 9;
- для варианта III - 48 (соответствует двум суткам), 9;
- для варианта IV - 168 (соответствует недельному циклу), 9.

Согласно методу спектрального сингулярного анализа было произведено разложение, восстановление, аппроксимация и прогнозирование электропотребления на следующие сутки 01.02.2012 для выбранных вариантов. Результаты прогнозирования показаны на рисунке 2.

Анализируя прогноз электропотребления с фактическим потреблением, можно сделать вывод, что наиболее точным является прогноз с длиной окна равной 24, в этом случае средняя относительная погрешность составляет 3,22 % и лежит по отдельным прогнозируемым часам в диапазоне от 0,1 % до 8,3 %.

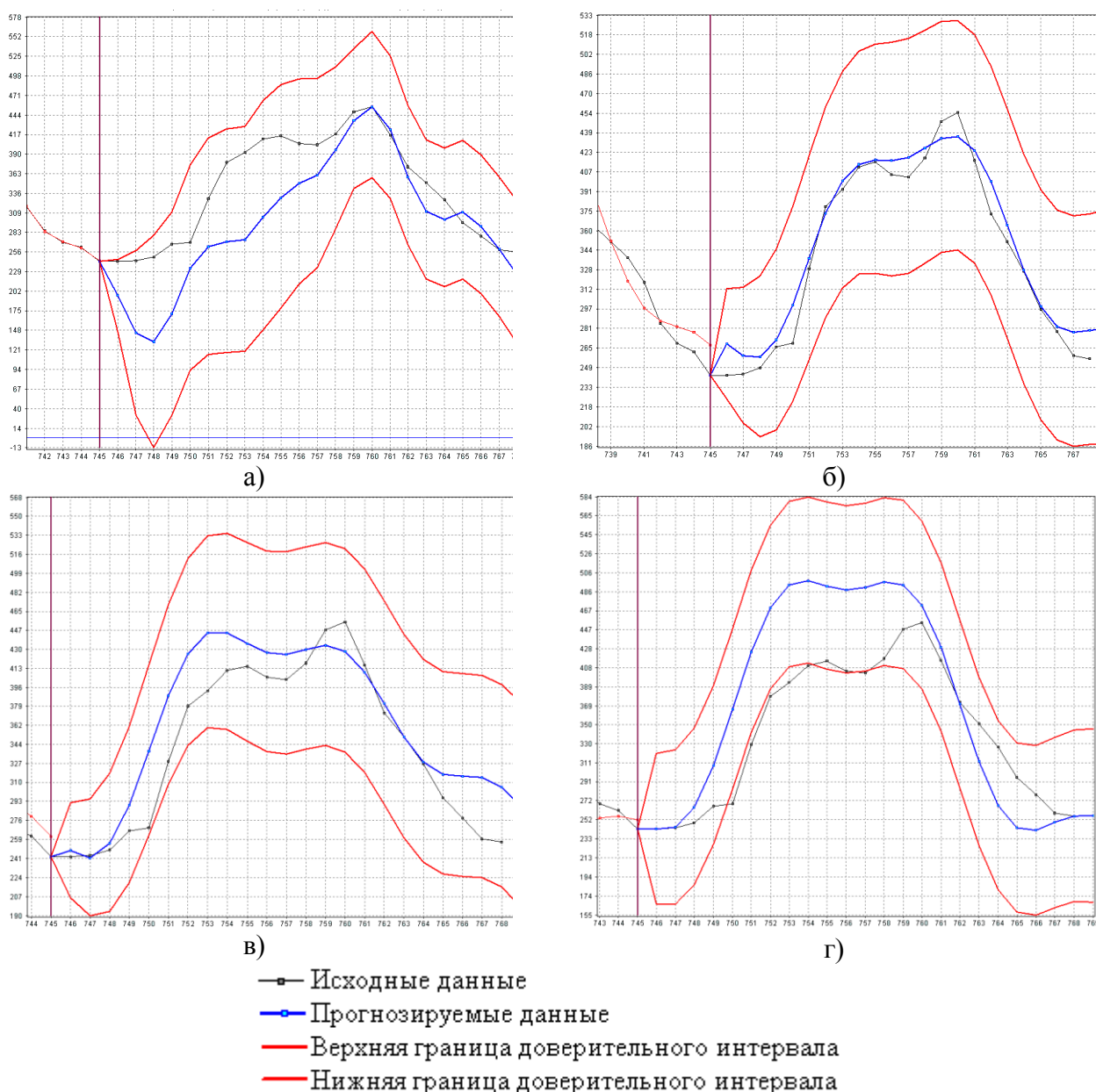


Рисунок 2 – Прогноз электропотребления  
 а) для варианта I; б) для варианта II; в) для варианта III; г) для варианта IV

Наихудшие результаты прогнозирования наблюдаются при длине окна 12 и 168, в этом случае средняя погрешность превышает 15 %, что не может считаться удовлетворительным результатом, однако даже такой прогноз находится в границах доверительного интервала.

На рисунках 3– 5 показаны дополнительные статистические графики, характеризующие восстановленный временной ряд при длине окна 24, а именно, исходный и восстановленный ряд, ряд остатков и относительные ошибки осреднения при восстановлении исходного ряда.

Из графика ряда остатков видно, что явно выраженные выбросы отсутствуют, поскольку остатки моделирования не выходят за границы трехкратного среднеквадратичного отклонения. Проверка подчиненности нормальному закону распределения по критерию Пирсона показала, что теоретические и эмпирические частоты отличаются не значительно, следовательно, гипотеза о нормальном распределении остатков верна. Тест на белый шум остатков моделирования

показал, что спектр остатков не выходит за пределы доверительного интервала, следовательно, это не коррелирующие остатки – белый шум.

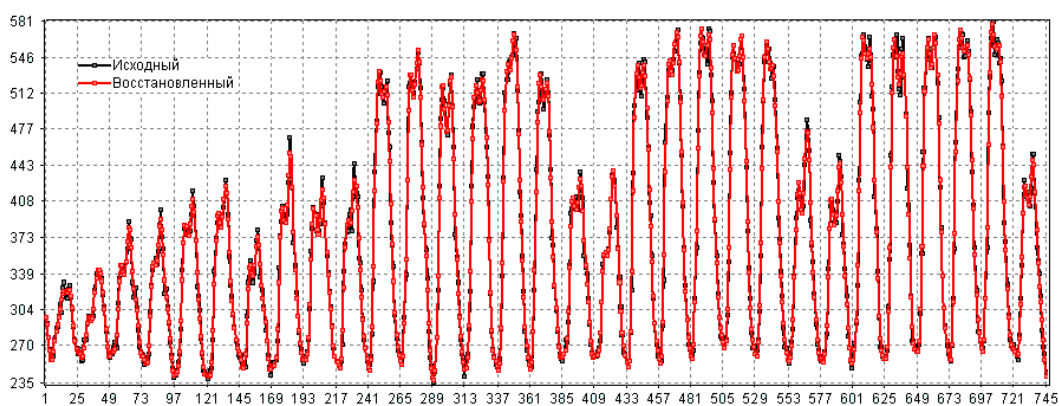


Рисунок 3 – Исходный и восстановленный ряд для варианта II

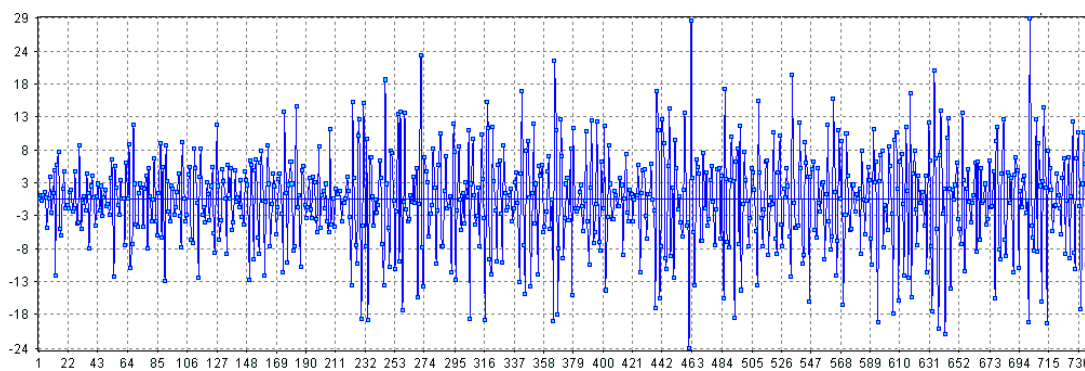


Рисунок 4 – Ряд остатков для варианта II

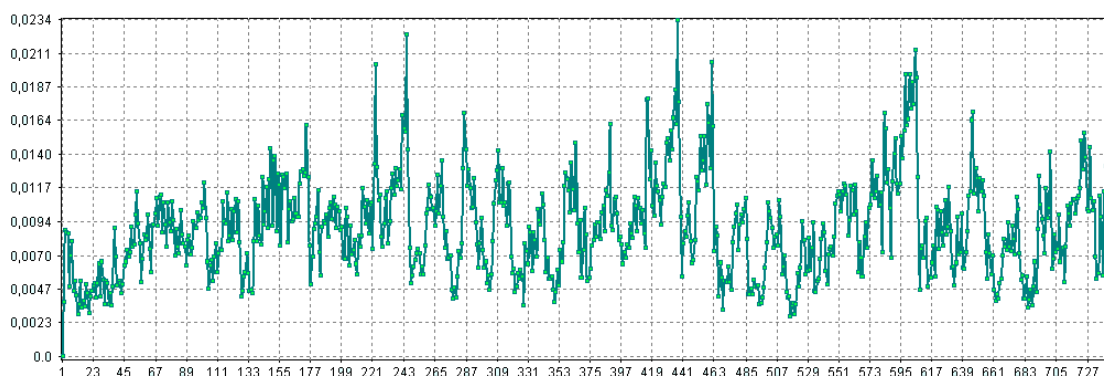


Рисунок 5 – Относительные ошибки осреднения при восстановлении исходного ряда для варианта II

На зависимостях абсолютных и относительных погрешностей восстановленного ряда, из представленных данных на рисунках следует, что относительная погрешность при восстановлении исходного ряда при использовании первых девяти главных компонент не превышает 2,5 %.

Выводы: Полученные данные позволяют говорить о том, что метод сингулярного спектрального анализа может быть использован для моделирования и прогнозирования электропотребления. Длина окна, соответствует суточному графику, при которой достигается наименьшая средняя погрешность, не превышающая 3,5%, составляет 24 и может быть использована для прогнозирования энергопотребления в распределительных электрических сетях.

Точное количество главных компонент не значительно влияет на точность прогноза, и для распределительных электрических сетей может приниматься равным девяти.

## ФОРМИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ «ЗВЕЗДА» ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

Кокорин Д.В., Лебедев Н.А. – студенты гр. Э-81, Грибанов А.А. – к.т.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Процесс эксплуатации электрооборудования и в частности силовых трансформаторов следует рассматривать как управляемый процесс. Одной из основных задач управления эксплуатацией силовых трансформаторов является предотвращение внезапных отказов или, по крайней мере, максимальное снижение риска их возникновения [1]. Поток отказов является следствием несовершенства изоляции силовых трансформаторов, развитием дефектов и повреждений в ней, что предопределяет необходимость тщательного изучения физики процессов нарушения электромагнитной совместимости при разнообразных эксплуатационных воздействиях. Кроме того, часто имеют место быть дефекты изготовления и эксплуатационные ошибки [2]. К дефектам в механической системе относятся в первую очередь механические повреждения обмоток, вызванные близкими короткими замыканиями. При этом возможна деформация геометрической формы обмоток, или снижение усилия запрессовки обмоток, которое в дальнейшем приводит к развитию деформации [3].

Современная тенденция развития методов диагностики и контроля состояния силовых трансформаторов, и в частности механического состояния их обмоток, направлена на адаптацию методов контроля отключенного и расшинованного трансформаторного оборудования для использования в нагрузочных режимах [4].

Основное назначение данной работы – это разработка математических моделей, описывающих процессы, протекающие в обмотках силовых трансформаторов при тестировании их импульсами напряжения. Это необходимо для прогнозирования технического состояния изоляции обмоток, а также для адекватного объяснения работы оборудования.

При изменении какого-либо параметра схемы замещения будет изменяться процесс, протекающий в обмотках и изоляции трансформатора. Объяснение этого процесса позволит объективно оценить работу оборудования и принять необходимые меры по его отключению, выводу в ремонт, устранению неполадок и предотвращению аварий.

В процессе исследования были разработаны несколько схем замещения трансформатора и на основании наиболее правильного учета всех параметров выбрана схема, более точно отображающая процессы, происходящие в обмотках силового трансформатора. После чего были обоснованы все элементы схемы замещения. На рисунке 1 приведена разработанная схема замещения обмотки одной фазы трансформатора.

Элементы, составляющие схему замещения обмотки одной фазы трансформатора:

$R_{тр}$  – сопротивление, эквивалентное потерям в стали на вихревые токи;  $X_{тр}$  – собственная индуктивность, образующаяся при проходе волны напряжения через обмотку трансформатора;  $B_{тр}$  – собственная реактивная проводимость;  $G_{тр}$  – проводимость, эквивалентная проводимости стали обмотки;  $C_3$  – емкость относительно корпуса (между обмоткой трансформатора и корпусом);  $C_2$  – межвитковая емкость между витками обмотки с диэлектрической изоляцией;  $C_1$  – межобмоточная (между фазными обмотками);  $R_{тр}$  – сопротивление, эквивалентное потерям в стали на вихревые токи;  $R_2$  – сопротивление, эквивалентное потерям между обмотками;  $R_3$  – сопротивление, эквивалентное потерям между витками обмотки;  $G_2$  – проводимость, эквивалентная проводимости между корпусом и обмоткой.

Для данной схемы выведено характеристическое уравнение, сама же схема была преобразована.



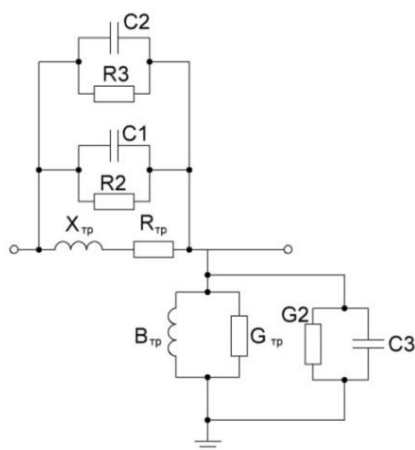


Рисунок 1 – Схема замещения обмотки одной фазы трансформатора

Для определения математической модели всего трансформатора необходимо соединить преобразованные схемы замещения обмотки одной фазы трансформатора в «звезду», тем самым получив схему замещения всего трансформатора, которая изображена на рисунке 2.

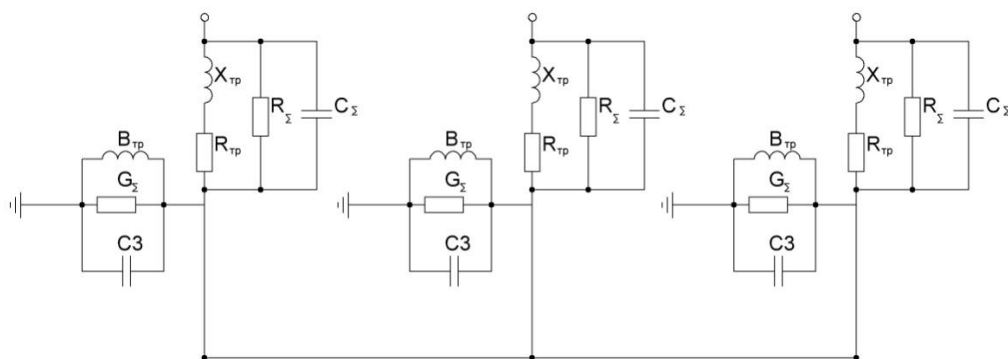


Рисунок 2 – Схема замещения трансформатора

Преобразование схемы:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2; \quad R_{\Sigma} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3};$$

$$G_{\Sigma} = G_{TP} + G_2$$

$$Z = \frac{1}{p \cdot C_{\Sigma} + \frac{1}{R_{\Sigma}} + \frac{1}{p \cdot X_{TP} + R_{TP}}} + \frac{1}{p \cdot B_{TP} + G_{\Sigma} + p \cdot C_3};$$

При соединении обмоток в «звезду» получаем полное сопротивление:

$$\frac{1}{Z_Y} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} = \frac{Z_2 \cdot Z_3 + Z_1 \cdot Z_3 + Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3}$$

Все ветви звезды имеют одинаковое сопротивление:

$$\frac{1}{Z_Y} = \frac{Z^2 + Z^2 + Z^2}{Z^3} = \frac{3 \cdot Z^2}{Z^3} = \frac{3}{Z} \quad Z_Y = \frac{Z}{3}$$

Составляем характеристическое уравнение:

$$3 \cdot p^3 \cdot (C_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma} \cdot X_{TP} \cdot B_{TP} + C_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma} \cdot X_{TP} \cdot C_3) + p^2 \cdot (X_{TP} \cdot R_{\Sigma} \cdot B_{TP} + X_{TP} \cdot R_{\Sigma} \cdot C_3 + C_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma} \cdot X_{TP} + \\ + 3 \cdot C_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma} \cdot R_{TP} \cdot B_{TP} + 3 \cdot C_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma} \cdot R_{TP} \cdot C_3 + 3 \cdot X_{TP} \cdot B_{TP} + 3 \cdot X_{TP} \cdot C_3 + 3 \cdot C_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma} \cdot X_{TP} \cdot G_{\Sigma}) + \\ + p \cdot (X_{TP} \cdot R_{\Sigma} \cdot G_{\Sigma} + R_{TP} \cdot R_{\Sigma} \cdot B_{TP} + R_{TP} \cdot R_{\Sigma} \cdot C_3 + C_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma} \cdot R_{TP} + X_{TP} + 3 \cdot R_{TP} \cdot B_{TP} + 3 \cdot R_{TP} \cdot C_3 + \\ + 3 \cdot R_{\Sigma} \cdot B_{TP} + 3 \cdot R_{\Sigma} \cdot C_3 + 3 \cdot C_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma} \cdot R_{TP} \cdot G_{\Sigma} + 3 \cdot X_{TP} \cdot G_{\Sigma}) + R_{TP} \cdot R_{\Sigma} \cdot G_{\Sigma} + R_{TP} + R_{\Sigma} + 3 \cdot R_{TP} \cdot G_{\Sigma} + 3 \cdot R_{\Sigma} \cdot G_{\Sigma} = 0$$

Для нахождения корней полученных уравнений необходимо задаться значениями всех элементов схемы замещения.

Подавая тестовый сигнал в виде прямоугольного импульса на один из выводов, и снимая характеристику с другого, наблюдается малое влияние третьей обмотки трансформатора. Экспериментально доказано, что влияние третьей обмотки настолько мало, что убирать её из расчетов нет необходимости, поэтому в схеме замещения трансформатора и дальнейших расчетах она будет присутствовать. Следовательно, схема замещения трансформатора не изменится и будет такой, как изображена на рисунке 2. Характеристики, полученные в ходе эксперимента, приведены на рисунке 3.

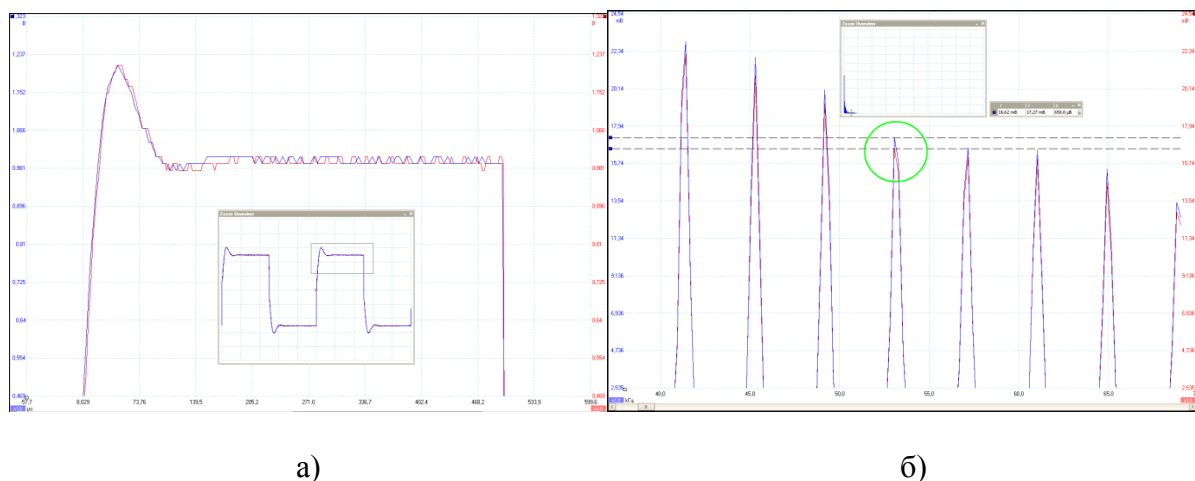


Рисунок 3 – Характеристики трансформатора, снятые с третьей обмоткой (красный), без третьей обмотки (синий):

а – кривые на выходе; б – кривые, разложенные в спектр

В дальнейшем планируется провести эксперименты при соединении обмоток трансформатора в «треугольник», разобрать еще одну схему замещения силового трансформатора, проанализировать спектры снятых характеристик и сопоставить их с дефектными элементами.

Данный математический метод позволит делать выводы о техническом состоянии обмоток трансформатора с более высокой достоверностью за счёт выявления причины изменения диагностического сигнала и своевременно производить необходимые мероприятия по устранению неполадок в процессе эксплуатации силовых трансформаторов.

#### Список использованных источников

1. Танфильева, Д. В. Разработка моделей диагностики и оценки состояния силовых маслонаполненных трансформаторов. [Текст] : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.14.02 / Танфильева Дарья Васильевна. – Новосибирск, 2012. – 178 с.

2. Михеев, Г. М. Автоматизированные ресурсосберегающие методы и приборы для диагностики высоковольтного электрооборудования. [Текст] : дис. на соискание ученой степени док. техн. наук : 01.04.01 / Михеев Георгий Михайлович. – Чебоксары, 2008. – 378 с.

3. Панкратов, А. В. Контроль параметров схем замещения однофазных трансформаторов применительно к задаче мониторинга состояния активных частей. [Текст] : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.09.01 / Панкратов Алексей Владимирович. – Томск, 2009. – 127 с.

4. Прохоров, А. В. Разработка метода мониторинга механического состояния обмоток силовых трансформаторов в нагрузочных режимах. [Текст] : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.14.02 / Прохоров Антон Викторович. – Томск, 2010. – 202 с.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО КОМПЛЕКСУ ПРИЗНАКОВ

Лебедева А.А., Кожевникова К.В.– студенты гр. Э-91, Грибанов А.А. – к.т.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

В настоящее время в энергетике несовершенство многих автоматизированных систем управления заключается в недостаточно точных результатах диагностики, что влечёт за собой ложные выезды ремонтных бригад и ошибочные ремонты, которые требуют определенных материальных расходов, что является не выгодным.

Основная причина неточности данных в результате контроля заложена в техническом обеспечении, используемом в системе. Техническое обеспечение включает в себя совокупность технических средств, компьютерной техники, средств передачи информации. Компьютерная техника, используемая на энергетических предприятиях в настоящий момент, достигла высокого уровня точности и надёжности. Однако, как и любая техника, она может выйти из строя в связи с факторами, которые не предусмотрены предприятием.

Основное назначение данной работы – исследование уже существующих способов повышения достоверности диагностической информации, а так же разработка новых методов улучшения контроля работы силового трансформатора за счёт использования современных информационных технологий.

Диагностика – это разовое или периодическое обследование технического состояния объектов энергетики. Известно, что развитие дефектов до факта аварии в электрооборудовании во времени происходит достаточно медленно. Этот период может составлять от нескольких месяцев до нескольких лет. В качестве объекта контроля были выбраны силовые трансформаторы, которые нуждаются в тщательной проверке, так как подвергаются перенапряжениям, вызванным атмосферным давлением или сформированным внутри силовой системы. Не смотря на то, что перед выпуском с завода трансформаторы проходят определённые испытания электрической прочности изоляции, они могут быть подвергнуты более серьёзным перенапряжениям по сравнению с условиями тестовых испытаний. При этом возникают проблемы по оценке степени опасности того или иного дефекта. Результаты исследования показывают, что наибольшее число проблем в силовых трансформаторах связано с нарушениями в работе систем охлаждения, вводов и нарушением уплотнений – около 40%. Распрессовка обмоток и магнитопроводов составляет порядка 10%, столько же – нарушение характеристик масла. Вместе с тем опыт исследований показывает, что более 70 % дефектов может быть выявлено без отключения трансформаторов.

При оценке технического состояния трансформатора только по маслу отсутствует функция качества, учитывающая концентрации всех газов в комплексе, что не позволяет выполнить обоснованное прогнозирование развития проблем. В некоторой степени результат может быть улучшен на основе анализа специалиста-эксперта. Тогда на базе имеющегося опыта удастся получить приближенное диагностическое заключение о техническом состоянии масла. Так же выполняются работы по тепловизионному обследованию узлов трансформатора, вибродиагностике с целью определения состояния магнитопровода и обмоток, измерению частичных разрядов электрическим методом и их локализации в пространстве акустическим методом.

На основании полученных результатов делается заключение о необходимости измерений на отключенном трансформаторе и, в крайнем случае, разборке трансформатора для визуального осмотра и измерений. Такая технология диагностики позволяет существенно снизить затраты на производство работ, обоснованно распределить ресурсы на техническое обслуживание, реализовать систему обслуживания по действительному техническому состоянию.

## ОБУЧАЮЩИЙ ТРЕНАЖЕР-КОНСТРУКТОР «СХЕМЫ ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДСТАНЦИЙ 35-750 КВ»

Минченко В.В., Пастухов И.В. – студенты гр. Э-94, Гутов И.А. – к.т.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Современные компьютерные технологии являются мощным инновационным инструментом, значительно повышающим эффективность обучения и производительность труда как преподавателя, так и каждого студента в отдельности. Внедрение этих технологий и использование специальных обучающих программ в учебном процессе - важнейший компонент подготовки будущих бакалавров и инженеров к дальнейшей профессиональной деятельности. Применение вычислительной техники в учебном процессе открывает новые пути в развитии навыков мышления и умения решать сложные проблемы, предоставляет принципиально новые возможности для активизации обучения. Информационные технологии позволяют сделать аудиторные и самостоятельные занятия более интересными, динамичными и убедительными, а огромный поток изучаемой информации легко доступным.

На данный момент существует мало разработок программного обеспечения (ПО) в области электроэнергетики для подготовки бакалавров и специалистов по специальным учебным дисциплинам.

Существующие программы позволяют составлять простые и сложные схемы, используя большие библиотеки элементов, зачастую не адаптированные для конкретных учебных заданий, а простые программы-тестеры по составлению и проверки электрических схем в настоящее время отсутствуют. Системы автоматизированного проектирования AutoCAD, Компас позволяют составлять схемы любой сложности, но не осуществляют проверку их правильности, в этих программах невозможно потренироваться в правильности составления схем. Программы для моделирования MatLab, LTspice имеют возможность проверки схем, но они сложны в использовании и больше подойдут для специалистов, но не как для проверки знаний или обучения студентов электротехнических специальностей и направлений.

Таким образом, существующее ПО обладает рядом недостатков, которые затрудняют его внедрение в учебный процесс:

- во-первых, программы содержат большое количество условных изображений элементов электрических схем и выбрать нужное из этих библиотек непросто для начального этапа обучения;
- во-вторых, требуется значительное время на освоение порядка проектирования в этих программах;
- в-третьих, еще одним недостатком этих программ является невозможность проверки правильности составленных схем.

Одним из путей решения данной проблемы является разработка и внедрение в учебный процесс компьютерных обучающих программ тренажеров. Они должны отличаться определенной спецификой: простотой освоения, узкой направленностью и учитывать особенности изучения специальных дисциплин. При разработке данных программ необходимо учитывать следующие общие требования:

- интуитивно понятный интерфейс, не требующий затрат времени на изучение;
- небольшие требования к программному обеспечению, дающие возможность пользоваться программой на компьютерах с низкой производительностью;
- простота внесения изменений и адаптации к изменяющемуся учебному материалу;
- наглядность задания и результатов работы.

На кафедре «Электроснабжения промышленных предприятий» (ЭПП) АлтГТУ преподаватели совместно со студентами ведут работы по созданию электронных лабораторных практикумов по ряду специальных дисциплин, например для дисциплины «Электроэнергетические системы и сети». Данная дисциплина является одной из обязательных базовой (общепрофессиональной) части профессионального цикла направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника». Общая цель дисциплины - изучить теорию передачи электрической

энергии, физику процессов, происходящих в электрических сетях и системах, способы моделирования элементов и электрической сети в целом, методы расчётов их эксплуатационных режимов, основы проектирования электрических сетей, методы и методики расчета и выбора основных элементов электрических сетей, получить практические навыки по проектированию электрических сетей, выбору и расчету основного электрооборудования электрических систем и сетей, а также дать представление о требованиях к улучшению режимов электрических сетей и об условиях оптимального управления [1].

При проектировании электрических сетей приходится рассматривать обширный круг вопросов, одним из которых является изучение схем электрических подстанций и соответствующего оборудования. Основными элементами подстанций электрических сетей являются силовые трансформаторы и автотрансформаторы, коммутационные аппараты, измерительные приборы, средства релейной защиты, автоматики и телемеханики. Студентам необходимо изучить типовые схемы подстанций, конструкцию открытых (ОРУ) и закрытых (ЗРУ) распределительных устройств и состав основного силового оборудования. На изучение вопросов связанных с данной темой отводится относительно немного времени в рамках данной дисциплины. Понимание данной темы студентами зависит от способа донесения информации, и использование компьютерных программ позволит более эффективно освоить данную учебную тему.

Поэтому целью работы является создание программы, представляющей собой обучающий тренажер-конструктор, простой в управлении, с помощью которого студент мог бы получить и проверить свои теоретические знания и практические навыки.

В результате работы была создана программа Т-К ESiS, представляющая собой обучающий тренажер-конструктор. Программа Т-К ESiS входит в электронный лабораторный практикум по дисциплине «Электроэнергетические системы и сети» для студентов, обучающихся по профилю «Электроснабжение» направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

Разработанный тренажер-конструктор удовлетворяет следующие требования:

- функциональность программы;
- наглядный, удобный, интуитивно понятный пользователю интерфейс;
- простота освоения программы, даже начинающими пользователями (информационные подсказки, встроенные справочники и подробная документация);
- надежность программы, устойчивость к ошибкам пользователя.

Тренажер-конструктор представляет собой программу, предназначенную для составления принципиальных электрических схем распределительных устройств подстанций 35-750 кВ и проверки знаний по этой теме.

Программа Т-К ESiS имеет обширную базу типовых схем, в которую можно добавлять новые типовые и нетиповые схемы. Приведенные типовые схемы распределительных устройств следует применять при проектировании новых, расширении действующих и подлежащих техническому перевооружению и реконструкции подстанций всех ведомств согласно СТО ОАО «ФСК ЕЭС» [2].

Тренажер-конструктор разработан с расчётом на продолжительный жизненный цикл. Он имеет возможность к дальнейшему совершенствованию. На его основе можно составлять другие тренажеры.

Тренажер-конструктор может использоваться на всех этапах изучения данной учебной темы: начальное ознакомление, самостоятельное изучение, квалификационные проверки знаний.

Работа с разработанной программой не предполагает больших усилий со стороны студента, поскольку интерфейс программы достаточно прост и понятен.

При запуске программы появляется стартовое окно, которое содержит информацию о лабораторной работе, ее теме и цели. Для продолжения работы необходимо нажать на кнопку «Приступить к работе». В появившемся окне регистрации необходимо внести данные в соответствующие поля.

В программе существует два режима работы: режим проверки знаний для студентов и режим конструктора, который доступен только администратору. Администратор в режиме конструктора может составить новые схемы подстанций, которые дополняют существующую базу заданий для проверки знаний.

После прохождения регистрации появляется главное окно программы Т-К ESiS, вид которого в режиме проверки знаний представлен на рисунке 1.

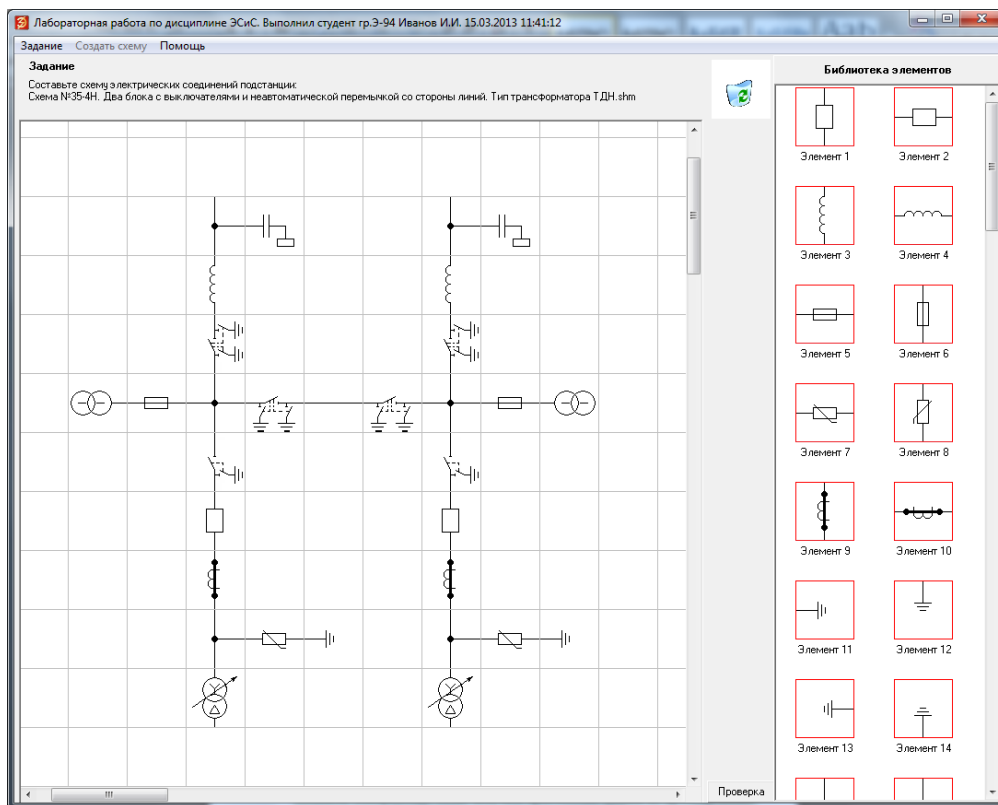


Рисунок 1 – Окно программы Т-К ESiS в режиме проверки знаний

В верхней части окна расположены следующие разделы меню: «Задание»; «Создать схему» (доступен только для администратора); «Помощь».

В правой части окна программы расположена библиотека элементов. Библиотека элементов разработана с учетом требований существующих стандартов по условным графическим изображениям основного силового электрооборудования и сгруппирована по категориям для удобного использования в процессе работы. Элементы перемещаются из библиотеки на поле программы, и из них собирается требуемая схема. Для удаления элементов с поля предусмотрена корзина, в которую нужно переместить удаляемый элемент.

В программе реализована проверка результатов работы. После завершения сборки схемы необходимо нажать на кнопку «Проверка», и программа проанализирует собранную схему и отобразит один из двух результатов: «Схема собрана без ошибок» или «Схема составлена неверно». Если схема собрана неправильно, то на экран выводится собранная пользователем схема и эталонная заданная схема подстанции и имеется возможность разобрать допущенные ошибки. После проверки исходное задание и результаты работы можно не только просмотреть на экране, но и сохранить в виде файла в формате \*.pdf. На рисунке 2 представлено окно программы с результатом неверно выполненного задания.

В разделах «Задание» и «Помощь» содержится теоретический материал для подготовки к лабораторному практикуму и руководство пользователя с подробными инструкциями.

В дальнейшем можно усовершенствовать данную программу:

- усовершенствовать ее до возможности составления в ней, не только, принципиальных электрические схем распределительных устройств подстанций 35-750 кВ, но и схем соедине-

ния электрических сетей;

- создать версию электронного пазла для мобильного телефона;
- добавить функцию, сохранения выбранных схем в формате AutoCAD и Компас;
- добавить в программу функцию, подробный анализ допущенной ошибки;
- доработать программу до возможности использования на всех курсах обучения и по разным дисциплинам.

разным дисциплинам.

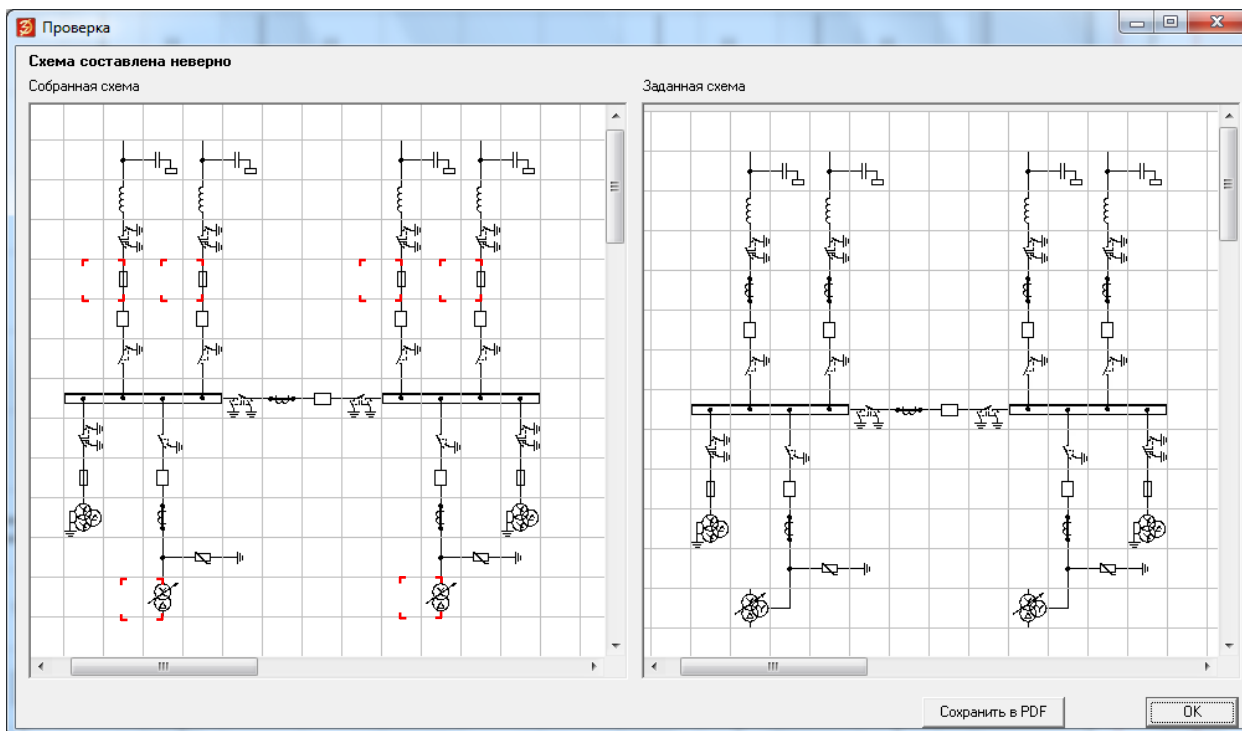


Рисунок 2 – Окно Проверка программы Т-К ESiS с результатом выполненного задания

Наличие новых потребностей общества в современной подготовке квалифицированных специалистов, особенно технических работников, требует высокого уровня научно-методического обеспечения процесса обучения. Решить эту проблему можно путем усовершенствования и внедрения инновационных методов обучения. Внедрение обучающих тренажеров-конструкторов значительно повысит уровень усвояемости студентами материала, позволит осуществить индивидуальный подход к обучению и проверки знаний, студентам эффективно самостоятельно работать и осваивать учебный материал.

#### Список использованных источников

1. СТО АлтГТУ 13.62.1.0213-2011. Стандарт организации. Система качества АлтГТУ. Образовательный стандарт высшего профессионального образования АлтГТУ. Образовательный стандарт учебной дисциплины. Электроэнергетические системы и сети. Направление подготовки - 140400 «Электроэнергетика и электротехника». Код дисциплины - Б.3.7. ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».
2. СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35 – 750 кВ. Типовые решения. Дата введения 2007-12-20. Издание официальное. ОАО «ФСК ЕЭС». 2007. – 132 с.



# АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ И АВАРИЙНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЗАДАННЫХ СЕЧЕНИЯХ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ТОПОЛОГИИ ПРИЛЕГАЮЩЕЙ СЕТИ

Поляков И.А. – аспирант, Капустин С.Д. – к.т.н., доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Электроэнергетическая система (ЭС) – электрическая часть энергосистемы и питающиеся от неё приемники электрической энергии, объединенные общностью процесса производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии [1]. Способность части ЭС к передаче электрической энергии в интересующий энергорайон с сохранением статической апериодической устойчивости можно характеризовать максимально допустимым перетоком (МДП) и аварийно допустимым перетоком (АДП). Эти величины представляют собой предельные значения перетока активной мощности, протекающего через заданное сечение. Предельные значения согласно [2] и [3] определяются по максимальному из условий (таблица 1), ограничивающих режим.

Таблица 1 – Критерии для определения МДП и АДП

Критерии	Режим/ схема	АДП	МДП
Токовые нагрузки электросетевого и генерирующего оборудования	нормальная (ремонтная) схема	не превышают длительно допустимых значений	не превышают длительно допустимых значений.
	в послеаварийных режимах при нормативных возмущениях	-	не превышают аварийно допустимых (на время 20 минут) значений.
Коэффициент запаса статической апериодической устойчивости по активной мощности в контролируемом сечении	нормальная (ремонтная) схема	не менее 0,08	в нормальной (ремонтной) схеме – не менее 0,20
	в послеаварийных режимах при нормативных возмущениях	-	не менее 0,08.
Коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки	нормальная (ремонтная) схема	не менее 0,10	в нормальной (ремонтной) схеме – не менее 0,15
	в послеаварийных режимах при нормативных возмущениях	-	не менее 0,10.
Динамическая устойчивость	при нормативных возмущениях	допускается несохранение устойчивости (в том числе динамической), при этом не допускается каскадное развитие аварии.	отсутствие нарушения динамической устойчивости при нормативных возмущениях

Режим работы ЭС, для которого определяются МДП и АДП - неравномерный. Непостоянна топология сети, изменяются нагрузки в узлах и их распределение, соотношение пассивных и активных параметров схем замещения и т.д. Неравномерность режима можно предста-

вить как множество уникальных статичных режимов – «срезов», которые будут представлять собой комбинации из определяющих режим параметров.

Очевидно, что множеству таких «срезов» соответствует множество МДП и АДП. Иными словами, МДП и АДП для какого-либо заданного сечения есть непостоянная во времени величина. Для постановки в соответствие текущему режиму соответствующих МДП и АДП необходима автоматизация их расчетов.

В данной работе была произведена автоматизация расчета МДП и АДП для режимов, отличающихся топологией сети. В качестве изменяющихся параметров исходного режима были выбраны варианты с отключенными сетевыми элементами, входящими в сечение и прилегающими к нему. На основе приложения Microsoft Excel созданы алгоритмы с использованием макро программирования, позволяющие:

- производить перечень схем, содержащих в себе последовательно комбинации с отключенными 1, 2, ... , n сетевыми элементами, отключение которых оказывает значительное влияние на величины МДП и АДП. Далее автоматически перечень схем преобразуется в удобный для расчетных программ вид. В качестве расчетной программы использован ПК RastrWin3;

- преобразовывать файлы, полученные от ПК RastrWin3, в удобный для дальнейшей работы вид;

- автоматически на основе перечня схем (п.1) каждой из схем ставить в соответствие набор из последующих схем, которые отличаются одним дополнительным отключенным элементом;

- производить анализ информации, полученной в результате расчетов (п.2), с целью определения величин перетока активной мощности в заданном сечении, соответствующих критериям МДП и АДП (таблица 1);

- производить комплексный анализ значений перетока активной мощности (п.4) с целью определения результирующих критериев и последующим определением МДП и АДП.

Данные алгоритмы были опробованы для определения значений МДП и АДП в контролируемом сечении с перебором всех из 9109 вариантов с отключением до 4-х из 22 контролируемых сетевых элементов.

В результате анализа полученных результатов сделаны следующие выводы:

- разработанные алгоритмы и макросы позволяют производить автоматизированный расчет МДП и АДП в сечениях для режимов, различающихся топологией сети;

- наибольшая точность расчета достигается для полных сечений для случаев, когда ограничивающим критерием является токовая загрузка сетевого элемента;

- при значительном ослаблении неполного сечения отключением нескольких элементов для повышения точности расчетов необходимо учитывать и контролировать состояние шунтирующих связей;

- в случае, если через контролируемое сечение протекает транзитный переток (т.е. его переток через сечение равен нулю), то для повышения точности расчетов необходимо фиксировать и контролировать его направление и величину.

Список использованных источников

1. ГОСТ 21027-75 Системы энергетические. Термины и определения [Текст].;
2. Методические указания по устойчивости энергосистем [Текст]. Утв. Приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 277;
3. Правила определения максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях диспетчерского центра ОАО «СО ЕЭС» [Текст]. Утв. и введен в действие приказом ОАО «СО ЕЭС» от 18.01.2013 №10.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ АВАРИЙНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Пряничников А.А., Тарасов В.В.– студенты гр. Э-92, Грибанов А.А. – к.т.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Аварийное освещение на современных промышленных предприятиях является важнейшим элементом в общей системе обеспечения безопасности труда человека. Аварийное освещение – часть освещения, которая продолжает работать в случае прекращения штатной подачи электроэнергии. Оно актуально для производственных помещений, в которых даже после нарушения электроснабжения системы рабочего освещения функционирует технологическое оборудование или продолжают по инерции движение некоторые элементы механизмов и машин, опасные для жизни человека. Во время отключения рабочего освещения должно автоматически включаться аварийное освещение, которое обеспечит освещение опасных участков и поможет людям без травм покинуть помещение. В настоящее время на большинстве производств установлены только таблички направления эвакуационного выхода, что повышает вероятность травматизма в случае чрезвычайной ситуации и отключения основных источников освещения.

На данный момент, при питании небольших производственных помещений от одного источника аварийное освещение питается от того же источника, что и основное рабочее освещение. При отключении подачи электроэнергии, пропадёт и рабочее освещение, и аварийное. Это может привести: к панике, к травматизму и в некоторых случаях к летальному исходу, из-за того, что не был виден путь эвакуации, который предназначен для безопасного выхода из помещения, в котором могут оставаться движущиеся по инерции опасные детали механизмов и машин. Так же, было замечено, что таблички указания эвакуационного выхода не подсвечиваются и мало заметны в случае аварийной ситуации. Для решения описанной проблемы предлагается схема работы аварийного освещения, которая будет надёжней, экономически выгодной и безопасной, чем существующая в наше время. Основной принцип работы схемы заключается в переключении на аварийный источник питания и освещение помещения во время отсутствия напряжения в основной сети. Для этого в основной цепи подключается реле напряжения. Когда напряжение в сети есть – реле замкнуто в одном положении для нормальной работы штатных источников освещения. При отсутствии напряжения в сети реле замыкается во второе положение, тем самым замыкая цепь аварийного освещения. Цепь аварийного освещения питается от аккумуляторных батарей, которые в нормальном режиме работы заряжаются от основной сети. После замыкания аварийного питания напряжение подается на светодиоды. Это обеспечивает большую вероятность того, что люди найдут эвакуационный выход. Также помимо светодиодов, которые освещают помещение, питание от аварийного источника подается на таблички эвакуационного выхода.

В ходе дальнейшей работы будут получены различные варианты реализации описанной выше системы питания аварийного освещения, а также будут выполнены расчёты технических и экономических показателей качества и надёжности выбранной схемы питания аварийного освещения. Это поможет улучшить безопасность на предприятиях с опасными производствами, снизит вероятность травматизма в моменты отключения от основного источника питания и в ходе эвакуации людей из помещения. Так же благодаря этому освещению можно закончить сложный технологический процесс, так как его остановка приведёт к значительным экономическим потерям.

## АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Стецов А.П., Егель А.Р. – студенты гр. Э-81, Рыбаков В.А. – к.т.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

В данной работе рассматриваются вопросы влияния ультразвука на показатели качества трансформаторного масла.

Одним из основных вопросов, решаемых при проектировании оборудования в электроэнергетических системах, является вопрос о повышении надежности силового оборудования, в котором присутствует трансформаторное масло. К такому оборудованию относятся трансформаторы, автотрансформаторы, некоторые виды выключателей, маслонаполненные кабели и т.д.

Уровень пробивного напряжения, кинематическая вязкость, наличие влаги, примесей и кислотное число имеет большое значение и является частью общей проблемы повышения КПД работы систем электроснабжения и улучшения качества электроэнергии. Повышение этих показателей качества трансформаторного масла достигается путем контроля его уровня, очистки от твердых примесей, отделения влаги с помощью силикагеля, добавления ингибиторов и других мероприятий.

Одним из основных эффектов воздействия ультразвука на жидкость является кавитация – образование в жидкости большого количества пульсирующих пузырьков (каверн, полостей), заполненных паром, газом или их смесью. В интенсивной звуковой волне во время полупериодов разрежения возникают кавитационные пузырьки (рисунок 1), которые резко схлопываются после перехода в область повышенного давления, порождая сильные гидродинамические возмущения в жидкости и интенсивное излучение акустических волн[1].



Рисунок 1 – Кавитация

В процессе работы масло подвергается ультразвуковому воздействию за счет высокочастотных колебаний токопроводящих частей электрооборудования, что сильно влияет на его свойства. Также имеется гипотеза об изменении его пробивного напряжения при сильном ультразвуковом воздействии.

На сегодняшний день существует ряд теорий объясняющих механизм пробоя жидких диэлектриков. Согласно наиболее достоверной из них, пробой происходит в два этапа[2]. На первом этапе происходит пробой в газовом пузырьке, на втором, получившиеся в результате пробоя в пузырьке положительные и отрицательные ионы располагаются в разных концах пузырька и, под воздействием электрического поля, растягивают его в разных направлениях от плюса к минусу (рисунок 2). В результате образуется пробивной канал. Ультразвуковое

воздействие будет оказывать двойное влияние на процесс формирования канала пробоя. С одной стороны, увеличится количество газовых пузырьков, что будет способствовать снижению пробивного напряжения. С другой стороны, благодаря повышению текучести жидкости, часть пузырьков будет исчезать, не приводя к образованию пробивного канала.

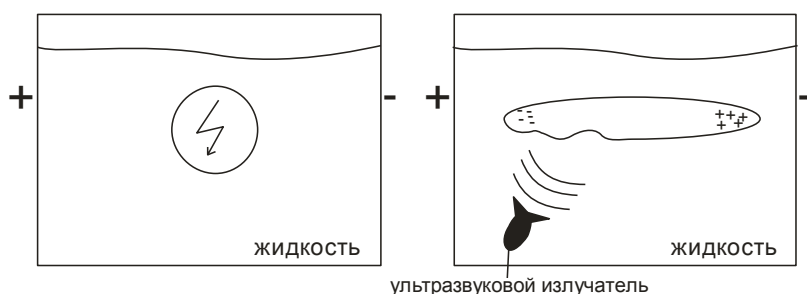


Рисунок 2 – Пробой жидкости при ультразвуковом воздействии

Все вышесказанное позволяют сделать вывод о том, что ультразвук оказывает влияние на свойства трансформаторного масла. Но для углубленного изучения этого эффекта необходимы экспериментальные исследования.

Суть экспериментальных исследований будет заключаться в определении ультразвукового воздействия в работающем трансформаторе, регулярном контроле качества масла и выявления взаимосвязи между этими параметрами. Также необходимо проведение экспериментов по определению пробивного напряжения при сильном ультразвуковом воздействии.

Ультразвуковые волны планируется получать при помощи таких методов как генерирование электрических импульсов необходимой частоты и преобразование электрических импульсов в акустические волны.

Основой первого метода являются генераторы ультразвуковых частот, построенные на схемах, основанных на полупроводниковых транзисторах. Второй метод основан непосредственно на излучателях (магнестрикционных и пьезоэлектрических). Наиболее простым и пригодным для данной работы является первый метод. Ниже на рисунке 3 приведена принципиальная схема ультразвукового генератора.

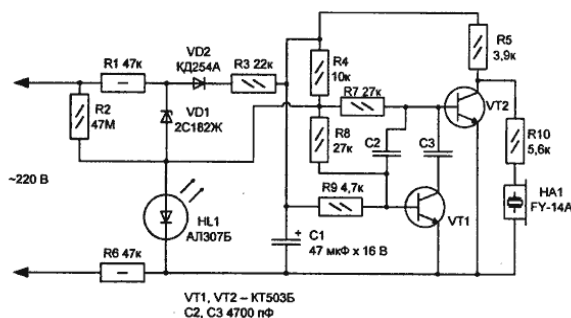


Рисунок 3 – Генератор ультразвуковых частот

На данном этапе научно-исследовательской работы ведется разработка и сборка устройства для излучения ультразвука в жидкости, а так же разработка защитного корпуса, который будет пропускать ультразвук, но в тоже время позволит защитить устройство от воздействия высоких напряжений при проведении опытов.

Таким образом замедление старения трансформаторного масла и повышение его пробивного напряжения поможет повысить качество и надежность электроснабжения, а так же извлечь дополнительную выгоду вследствие снижения количества аварий в электроустановках.

#### Список использованных источников

1. Голямина, И. П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия [Текст] / И. П. Голямина, М. А. Исакович, Ю. И. Китайгородский, В. Я. Лямов, И. Б. Найденева – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1979. – 400 с., илл.
2. Богорбдицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. — 7-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.

### РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Фефелов А.А., Сташко В.И. – к.т.н., доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Задача повышения эффективности сельскохозяйственного производства не может быть успешно решена без повышения надежности работы электрооборудования и, в частности, электродвигателей, как наиболее распространенного в сельском хозяйстве типа электрических машин [1].

В сельском хозяйстве электродвигатели находятся в сложных эксплуатационных условиях: тяжелые режимы работы, низкое качество электроэнергии, пыль, влажность, агрессивные среды, колебания температуры и низкий квалификационный уровень обслуживающего персонала отрицательно сказываются на их работоспособности. Так, при среднем сроке службы 10 - 15 лет (наработка 40 тысяч часов) около 20% электродвигателей ежегодно выходят из строя [2].

Так, выполненные в 2002-2009 годах на сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края и ряда других регионов России исследования показали, что от общего числа отказов элементов конструкции ЭД повреждения обмоток составляют более 80 % при значительной доле выхода двигателей из строя в результате межвитковых замыканий в обмотке статора. В общем случае, из-за нарушения изоляции прекращают свою работу около 75 % электродвигателей, а экономический ущерб от выхода из строя одного двигателя достигает 20 тыс. руб. и более при стоимости нового ЭД – 1-8 тыс. руб. (в ценах 2009 года).

В целях недопущения простоя оборудования вследствие отказа электрического двигателя, необходим систематический контроль и своевременное восстановление свойств изоляции [3].

Для мелких сельхозпредприятий разработана методика оценки остаточного ресурса электродвигателей на основе измерения температуры корпуса и подсчета количества пусковых переходных процессов.

От сельхозпредприятий необходимо только измерять температуру корпуса и вести подсчет количества пусков, а затем передавать эти данные Региональному центру обеспечения надежности, где будет рассчитан износ изоляции асинхронных двигателей.

Поскольку процесс измерений, производимый вручную, является достаточно трудоемким, то одной из основных задач является автоматизация получения исходных данных. Для этого был разработан комплекс устройств, состоящий из устройства считывания данных, пульта подключаемого к устройству и персональному компьютеру с разработанной программой.

Устройство считывания данных устанавливается на АД и в автоматическом режиме ведет подсчет пусков, времени работы и измеряет температуру корпуса. Затем к данному устройству подключается специальный пульт, который считывает информацию о температурно-временных параметрах АД. Затем пульт подключается к ПК и передает полученную информацию, а специально разработанная программа рассчитывает остаточный ресурс электродвигателя.

При открытии программы, в ее окне появляется информация о подконтрольных электродвигателях. В первом столбце появляется информация о названии оборудования. Во втором столбце появляется информация о времени работы электродвигателей. В третьем столбце число пусков. В четвертом столбце температура корпуса электродвигателей. В пятом столбце появляется остаточный ресурс электродвигателей, выраженный в процентах.

На рисунке 1 представлен внешний вид устройства считывания данных. На рисунке 2 представлено окно разработанной программы.

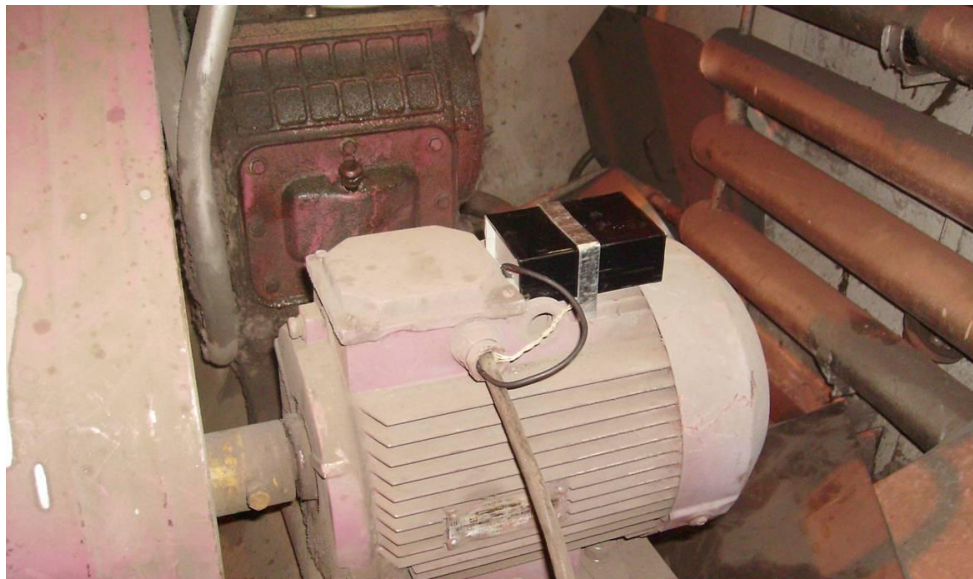


Рисунок 1 - Внешний вид устройства считывания данных

Название оборудования	Время работы, ч	Число пусков	Средняя температура, °С	Остаточный ресурс, %
Двигатель токарного станка	28	54	48,5	96,69
Двигатель сушилки 7,4 кВт	488	30	50,2	82,22
Обдуч 4,7 кВт	847	54	55,7	75,17
Дымосос резерв 2,2 кВт	26	5	59,2	97,18
Дымосос 2,2 кВт	288	38	65,2	88,29
Компрессор 1,8 кВт	345	42	52,4	93,53
Насос основной 2 кВт	298	57	68,3	87,32
Насос резерв 2 кВт	35	8	62,4	97,55
Электроталь 0,8 кВт	57	128	48,4	78,59
Электроталь 0,73 кВт	68	255	57,3	75,38

Обновить    Считать

программа запущена подключите устройство

Рисунок 2 - Интерфейс программы для прогнозирования остаточного ресурса электродвигателей

Разработанное устройство поможет автоматизировать процесс измерения температурно-временных параметров, а программа позволит прогнозировать остаточный ресурс электродвигателей, что повысит надежность электродвигателей эксплуатируемых на сельскохозяйственных предприятиях.

Список литературы:

1. Кобозев, Е.В. Экспертная система прогнозирования состояния электрических двигателей на основе использования результатов их диагностики в условиях сельского хозяйства: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2009.

2. Тонких, В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2009.

3. Хомутов, С.О. Система повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве на основе комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции: Автореферат дис. ... докт. техн. наук. – Барнаул, 2010.