

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Энергетический факультет

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЭНЕРГЕТИКИ – 2017**

*Электронный учебный материал*

Материалы студенческой научно-технической конференции  
17–22 апреля 2017 года

Минск 2017

УДК 621.311  
ББК 31 я 43  
А 43

В сборнике представлены материалы конференции, в которых отражены результаты исследований по проблемам автоматизации энергетических систем, повышения эффективности электрических сетей и систем энергообеспечения, рационального использования энергетических ресурсов.

**Рецензент**

Доцент кафедры «Информационные системы и технологии»  
Международного института дистанционного образования,  
к.т.н. М.А. Раджух

**Редакционная коллегия:**

Ю.В. Бладыко, Н.Б. Карницкий, В.Б. Козловская, А.Д. Корзников,  
Т.Ф. Манцерова, И.В. Новаш, В.А. Седнин, М.И. Фурсанов

Ответственный за выпуск П.И. Климкович

Белорусский национальный технический университет.  
Энергетический факультет.  
пр-т Независимости, 65/2, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: (017) 292-42-32 Факс: 292-71-73  
E-mail: ef@bntu.by  
<http://www.bntu.by/ef.html>  
Регистрационный № ЭИ БНТУ/ЭФ39-\_\_\_\_.2017

© БНТУ ЭФ, 2017

**Оценка электродинамической стойкости  
токоведущих частей  
комплектных распределительных устройств  
с учетом упругой податливости надставок сборных шин**

*Алехнович А.С., Баран А.Г.*

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.**

Сборные шины современных шкафов КРУ крепятся к опорно-проходным изоляторам с помощью надставок. Шины вместе с надставками и опорно-проходными изоляторами образуют единую колебательную систему при коротком замыкании. Упругие длинные надставки могут существенно повлиять на частоту колебаний шин [1]. Для оценки этого влияния составлено математическое описание задачи, которое включает в себя уравнения колебаний сборных шин и надставок, представленных упругими стержнями.

При формулировке задачи используется принцип связей механики. В соответствии с ним действие сборных шин на надставки заменяется реакциями связей. По отношению к надставкам они являются внешними силами, под действием которых надставки, представленные в расчетах консолью с одним зашечленным и другим свободным концами, совершают упругие колебательные движения при коротком замыкании. Учет колебаний надставок согласно ГОСТ 30323-95 выполняется приближенно.

Определение приведенной массы надставки  $M_{оп}$  производится из условия равенства жесткости  $C_{оп}$  и основной собственной частоты колебаний консоли с распределенной массой и расчетной модели изолятора с сосредоточенной массой  $M_{оп}$ . Приведенная масса и жесткость надставки по оси  $x$  определяется по формулам, приведенным в ГОСТ 30323-95.

Далее, в соответствии с ГОСТ, находятся отношения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и по зависимости  $r_1 = f(\alpha_1)$  при различных  $\alpha_2$  выбирается параметр  $r_1$ , с помощью которого находится основная частота собственных колебаний шины и динамический коэффициент  $\eta$ . Влиянием упругих колебаний надставок по оси  $y$  пренебрегаем, так как они в этом направлении имеют высокую жесткость, обусловленную продольной жесткостью стержня на растяжение или сжатие.

**Литература**

1 Стрелюк, М.И. Расчет электродинамической стойкости жесткой ошиновки произвольной конфигурации / М.И. Стрелюк, И.А. Прима // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1990. – № 5 – С. 9–13.

## **Использование солнечно-водородной энергии на приусадебном участке**

*Апетенок В.О.*

**Научный руководитель – к.т.н. Булойчик Е.В.**

В последнее десятилетие в Республике Беларусь, наблюдается серьезная заинтересованность государства в развитии альтернативных источников электрической энергии, в том числе и солнечной энергетики. Но в использовании этого вида энергии есть свои проблемы, главная из которых заключается в том, что основная выработка полезной мощности не совпадает с суточными пиками нагрузки. Данную проблему способны решить накопители энергии (аккумуляторы), работающие в связке с инвертором, но такие установки не подходят для хранения большого количества энергии, они дорогостоящи, требуют определенных условий использования, а так же занимают много места. В данной работе будет рассмотрен метод решения этой проблемы. Методом запасаения электрической энергии, может выступить метод известный со школы, а именно электролиз воды. При протекании тока не большой силы через воду на отрицательном электроде (катоде) выделяется водород, а на положительном электроде (аноде) – кислород. Когда же потребуется использовать водород для генерации электрической энергии можно использовать газотурбинную установку, в которой водород будет сожжен, с получением воды на выхлопе.

Но с хранением водорода существуют свои трудности. Первая из них заключается во взрывоопасности смеси водорода и кислорода (гремучий газ). Вторая – водород является очень легким газом и из-за этого он имеет большую способность к улетучиванию. Так же водород способен растворяться в металлах и диффузировать сквозь них, что ведет к дополнительным потерям, а так же разрушению стенок баллонов из сплавов металлов.

В данной работе рассмотрена целесообразность установок данного типа, а так же возможность использования их в различных отраслях хозяйственной деятельности человека.

Хранение водорода так же является не простой задачей, так как водород имеет большой объем и его хранение в чистом виде сопряжено с большими потерями. Использование установки по сжижению кислорода решает проблему с объемом, но усугубляет проблему потерь, а так же постоянное использование холодильных установок для поддержания низкой температуры требует больших затрат электрической энергии.

В случае для приусадебного участка идеально подходит метод хранения водорода основанный на принципе гидрирования толуола. Основной идеей данной установки является заготовка водорода в летний период и

сжигание его в парогазовой установке (ПГУ) во время суточных пиков нагрузки в зимний период, так как при сжигании водорода мы получаем не только электрическую энергию, но и тепловую, которая может пойти на отопление дома.

Использование принципа гидрирования толуола позволяет хранить водород при атмосферном давлении в небольшом объеме и при температуре окружающей среды. Потери водорода при таком хранении стремятся к нулю. При гидрировании толуола мы связываем толуол с водородом и получаем метилциклогексан, который представляет собой жидкость, в нормальных условиях. Когда же нам нужно выделить водород, проводим дегидрирование метилциклогексана с образованием толуола и водорода.

В результате расчетов, получено, что в течение календарного года на установке с солнечными батареями суммарной мощностью 15,86 кВт может быть получено 11438 кВт·ч электроэнергии. А в зимний период времени с помощью ПГУ может быть получено 2230 кВт·ч электроэнергии, таким образом, электрический КПД установки составляет 19,5 %, а срок окупаемости 145 лет. Следовательно, на данном этапе развития техники, использование такой установки является нерентабельным.

#### Литература

1 PV Potentialestimationutility [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>. – Дата доступа : 22.03.17.

2 Solartime [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://solartime.by/oborudovanie/solnechnye\\_batarei/solnechnye\\_batarei\\_solarmodule\\_KDM\\_KD-P260.html](http://solartime.by/oborudovanie/solnechnye_batarei/solnechnye_batarei_solarmodule_KDM_KD-P260.html). – Дата доступа : 22.03.17.

3 Альтернативная энергия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://altenergiya.ru/sun/mnogoobrazie-vidov-solnechnyx-panelej.html>. – Дата доступа : 22.03.17.

4 Белобородов, В.Л. Органическая химия / В.Л. Белобородов, С.Э. Зурабян, А.П. Лузин, Н.А. Тюкавкина. – М. : Дрофа, 2003. – 640 с.

5 Низковольтный электролиз воды [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.o8ode.ru/article/energo/electroliz\\_water.htm](http://www.o8ode.ru/article/energo/electroliz_water.htm). – Дата доступа : 22.03.17.

6 Новая генерация [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.manbw.ru/analitics/elliott.html>. – Дата доступа : 22.03.17.

7 Официальный сайт филиала «Энергосбыт» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.energosbyt.by/tariffs\\_ul\\_ee.php](http://www.energosbyt.by/tariffs_ul_ee.php). – Дата доступа : 22.03.17.

8 Энергоэффективность & Энергосбережение [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://energoberejenie.org/stati/istoriya-sozdaniya-solnechnyx-batarej>. – Дата доступа : 22.03.17.

## **Определение тока электродинамической стойкости гибкой ошиновки шинных пролетов типовых конструкций распределительных устройств 110 кВ с одним проводом в фазе АС-500/27**

*Баран А.Г.*

Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

В электроустановках высокого напряжения энергосистем широко применяются токоведущие конструкции с гибкими проводами, особенностью динамики которых в результате электродинамического действия токов короткого замыкания (КЗ) является недопустимое сближение и даже схлестывание проводников соседних фаз [1–3]. Электродинамические воздействия токов КЗ – ключевые факторы, влияющие на выбор геометрических размеров и механической прочности токоведущих конструкций.

Проведен вычислительный эксперимент по оценке электродинамической стойкости шинных пролетов типовых конструкций распределительного устройства 110 кВ длиной 18 и 27 м с различным количеством и сочетанием отпаек к конструктивным элементам. Вычисления проводились для пролетов с одним проводом в фазе АС-500/27. Подвес провода выполнен гирляндами изоляторов 9×ПС6-А. Стрела провеса провода составляет 5 % от длины пролета. Расчеты выполнены для климатического режима: температура воздуха 25 °С, отсутствие ветра и гололедного отложения.

Механический расчет проводников шинных пролетов распределительного устройства выполнен по компьютерной программе MR215, а расчет электродинамической стойкости – по компьютерной программе FleBus [3].

Вычислительный эксперимент выполнен путем проведения серийных расчетов для токов двухфазного КЗ от 0 кА до 50 кА с шагом 0,5 кА.

Анализ результатов вычислительного эксперимента для шинных пролетов длиной 18 м показывает что:

- по критерию схлестывания проводов фаз наименьший ток электродинамической стойкости в 43 кА имеет пролет без отпаек;
- по критерию схлестывания спусков отпайки с проводниками шин наименьший ток электродинамической стойкости в 26 кА имеет пролет с двумя отпайками;
- по критерию схлестывания спусков отпайки каждый пролет имеет ток электродинамической стойкости более 50 кА.

Анализ результатов вычислительного эксперимента для шинных пролетов длиной 27 м показывает что:

- по критерию схлестывания проводов фаз наименьший ток электродинамической стойкости в 26 кА имеет пролет без отпаек;

– по критерию схлестывания спусков отпайки с проводниками шин наименьший ток электродинамической стойкости в 23 кА имеют пролет с одной отпайкой и пролеты с двумя отпайками;

– по критерию схлестывания спусков отпайки каждый пролет имеет ток электродинамической стойкости более 50 кА.

В ходе вычислительного эксперимента установлено, что наличие отпаяк в пролетах ограничивает свободные движения гибких шин, увеличивая ток электродинамической стойкости пролета по критерию схлестывания проводов фаз. Однако, наличие отпаяк также может привести к снижению тока электродинамической стойкости связанным со схлестыванием спусков отпаяк с проводами шин.

### **Литература**

1 Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. – 9-е изд., стер. – М. : Издательство МЭИ, 2004. – 964 с.

2 Токоведущие части электростанций и подстанций: методическое пособие для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 03 «Электроснабжение» и 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» / И.И. Сергей [и др.]. – Минск : БНТУ, 2011. – 82 с.

3 Сергей, И.И. Проверка на схлестывание гибкой ошиновки распределительных устройств электростанций: методические указания для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроснабжение» и 1-43 01 03 «Электрические системы и сети» / И.И. Сергей, Е.Г. Пономаренко. – Минск : БНТУ, 2008. – 44 с.

**Выбор расчетной схемы  
для оценки электродинамической стойкости  
шинной конструкции  
комплектных распределительных устройств**

*Баран А.Г., Алехнович А.С.*

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.**

Исследования сборных шины комплектного распределительного устройства (КРУ) 10 кВ с номинальным током 3150 А обусловлены необходимостью проверки шкафов КРУ на электродинамическую стойкость при токе короткого замыкания (КЗ) равном 64 кА. Этим требованиям удовлетворяют составные медные шины из двух прямоугольных полос размерами  $2 \times (100 \times 10)$  мм<sup>2</sup>, номинальный ток которых равен 3610 А при стандартных условиях окружающей среды [1].

Проводники ответвлений к электрическим аппаратам в рассматриваемых линейных шкафах КРУ выполнены медными стержнями с размерами  $(34 \times 24)$  мм<sup>2</sup>, расчетным сечением 814 мм<sup>2</sup> и допустимым током 1575 А [1]. Для камеры вводной ячейки использованы двухполосные шины  $2 \times (100 \times 10)$  мм<sup>2</sup>, как и для сборных шин. Сборные шины расположены в вершинах треугольника и пропускаются в соседнюю ячейку через проходные изоляторы и резиновые вкладыши, допускающие поперечные перемещения шин. Шины жестко закреплены на медных стержнях-надставках в двух соседних камерах и, как правило, образуют многопролетную шинную конструкцию с неразрезными шинами. Расчетной схемой для них является балка с жестким опиранием на обоих опорах пролета [2]. Для шкафов КРУ с разрезными шинами, длина которых равна длине одного пролета, изменяются коэффициенты расчетной схемы  $\lambda$  и  $\eta_1$  [2].

Из конструктивных чертежей КРУ следует, что сборные шины имеют жесткое крепление к надставкам ответвлений к электрическим аппаратам, а в местах прохода сборных шин через перегородку имеется люфт, величиной 11–13 мм. Сравним его с максимальным прогибом шин при КЗ. Представим шину стержнем с опертыми концами и приближенно определим ее максимальный динамический прогиб в середине пролета. При этом считаем, что в этой точке к шине приложена мгновенная максимальное усилие как статическая нагрузка, средняя величина которой приближенно равна 2000 Н. В соответствии с [4] максимальный прогиб сборной шины

$$y_{\max} = 1,06 \frac{F_{\max} l^3}{48,7 E J},$$



где  $F_{\max}$  – максимальное мгновенное ЭДУ, Н;  $E$  – модуль упругости материала шин, Па;  $J$  – момент инерции поперечного сечения шины, м<sup>4</sup>.

Максимальный прогиб сборной шины фазы  $B$  составит

$$y_{\max} = 1,06 \cdot \frac{2000 \cdot 0,8^3}{48,7 \cdot 10^{11} \cdot 16,7 \cdot 10^{-9}} = 1,33 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Для фаз  $A$  и  $C$ , расположенных несимметрично относительно перегородки, прогибы будут меньше. Таким образом, максимальные прогибы шин при КЗ практически не превышают люфта в проходном изоляторе. Это позволяет принять расчетную схему одного пролета сборных шин между двумя соседними ответвлениями к шинным аппаратам в виде шины-балки, укрепленной на упругих медных надставках. Согласно ГОСТ [2] расчетной схемой шинной конструкции с упруго-податливыми опорами считается схема, в которой масса шины распределена по длине пролета, а опоры представлены сосредоточенной эквивалентной массой  $M_{\text{оп}}$  и пружинами с жесткостью  $C_{\text{оп}}$ . Надставки фаз имеют пространственное расположение, состоят из прямолинейных отрезков шин и крепятся к опорно-проходным изоляторам фирмы с  $P_{\text{min разр}} = 2,5$  кН. Длинные надставки и невысокая допустимая изгибающая нагрузка изолятора повышают риск нарушения электродинамической стойкости шинной конструкции.

При оценке электродинамической стойкости проводятся исследования для нескольких расчетных схем взаимодействия токов КЗ:

– по сборным шинам пролета протекают сквозные токи КЗ, токи в надставках равны нулю;

– точка КЗ находится в ячейке и ток в надставках равен току КЗ.

Для указанных схем выполняется анализ максимальных напряжений изгиба сборных шин и результирующих максимальных нагрузок, действующих со стороны сборных шин и надставок на опорно-проходные изоляторы фаз.

### Литература

1 Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

2 ГОСТ 30323-95. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – Введ. 01.03.1999. – Минск : Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2004. – 37 с.

4 Кудрявцев, Е.П. Расчет жесткой ошиновки распределительных устройств / Е.П. Кудрявцев, А.П. Долин. – М. : Энергия, 1981. – 96 с.

## Определение токов электродинамической стойкости пролетов распределительных устройств 110 кВ с одним проводом в фазе АС-185/29

*Баран А.Г., Баран Ю.Г.*

**Научный руководитель – Климкович П.И.**

ГОСТ Р 50254-92 регламентирует производить оценку электродинамической стойкости гибких проводов распределительных устройств.

С использованием компьютерной программы FleBus выполнен вычислительный эксперимент определения токов электродинамической стойкости пролетов длиной 20, 25 и 30 м распределительных устройств 110 кВ с одним проводом в фазе АС-185/29 и гирляндами изоляторов 9×ПС 6А. Согласно ПУЭ минимально допустимое междуфазное расстояние для напряжения 110 кВ составляет 0,45 м. Влияние гибкости порталов в расчетах не учитывалось.

Результаты расчета тока электродинамической стойкости, исходя из условия максимально допустимого сближения фаз, представлены в таблице 1. Анализ показывает, что для пролетов с междуфазным расстоянием более чем в два раза превышающим стрелу провеса провода, опасное сближение фаз не наступает. Следовательно ток электродинамической стойкости, в этом случае, должен быть определен из рассмотрения максимально допустимого тяжения провода при коротком замыкании.

Таблица 1 – Токи электродинамической стойкости, кА

Время КЗ, с	Длина пролета, м		
	20	25	30
0,1	–	33,38	27,15
0,2	20,90	29,15	23,50
0,3	–	26,85	21,80
0,4	–	17,00	12,60
0,5	17,55	15,80	11,20

В ходе проведения вычислительного эксперимента выявлено, что значения токов электродинамической стойкости для гибких шин полученные из условия допустимых тяжений в 1,5 и более раза больше значений полученных из условия максимальных сближений. Поэтому для анализа электродинамической стойкости пролетов необходимо использовать значения токов представленные в таблице 1. В случае если геометрия пролета не допускает опасного сближения проводов, ток электродинамической стойкости определяется исходя из условия максимально допустимого тяжения.

## **Беспроводные системы контроля температуры критически важного электрооборудования на основе ПАВ технологий**

*Баран А.Г., Баран Ю.Г.*

**Научный руководитель – Богуславский С.И.**

В мире более 60 компаний имеют дело с изготовлением либо использованием устройств на основе ПАВ технологий – технологии поверхностных акустических волн.

Известно, что рабочая температура оборудования имеет очень высокую корреляцию с ее эксплуатационным ресурсом. Следовательно, мониторинг температуры дает неоценимые данные о работоспособности этого оборудования. Раннее обнаружение зарождающихся проблем приводит к своевременному их выявлению и обеспечению оптимального планирования технического обслуживания оборудования.

Существует ряд вариантов беспроводного контроля температуры:

- оптический с использованием инфракрасных термодетекторов;
- на основе радиотехнологий.

Одним из типов беспроводного мониторинга с использованием радиотехнологий, являются пассивные беспроводные радиомониторинговые системы контроля температуры, которые идеальны для электрооборудования среднего и высокого классов напряжения.

Преимущества ПАВ технологии для контроля температуры:

- мониторинг токоведущих элементов;
- пассивные датчики без элементов питания;
- автоматизация и отсутствие человеческого фактора;
- интеграция в промышленные сети и интернет;
- беспроводной контроль токоведущих узлов;
- непрерывный контроль узлов под напряжением;
- длительный срок службы, без обслуживания.

Современный мировой рынок систем мониторинга температуры электрооборудования представлен следующими известными компаниями:

- IntelliSAW – [www.intellisaw.com](http://www.intellisaw.com).
- SenGenuity – [www.sengenuity.com](http://www.sengenuity.com).
- CarinthianTechResearch (CTR) – [www.ctr.at](http://www.ctr.at).
- EnvironetixTechnologiesCorporation – [www.environetix.com](http://www.environetix.com).
- RF SAW, Inc. – [www.rfsaw.com](http://www.rfsaw.com) (ПАВ Лаборатория – [www.rfsaw.ru](http://www.rfsaw.ru)).

Каждая из компаний имеет собственные разработки, как оборудования, так и систем мониторинга, которые легко интегрируются в системы SCADA энергообъектов с промышленным стандартом связи.

## Моделирование коммутационных перенапряжений в среде Simulink MatLab

*Баранов В.Б.*

Научный руководитель – Артеменко К.И.

Коммутационные перенапряжения формируются в результате резкого изменения режима работы электросети, связанными с изменениями включениями/отключениями мощных приемников, с емкостным или индуктивным характером нагрузки. Исследования коммутационных перенапряжений реализуются методами математического моделирования. Одной из программ является MatLab со своим приложением Simulink. Simulink выполняет симуляции работы моделируемых систем и устройств.

Целью работы является изучение возникновения коммутационных перенапряжений, их видов, особенностей и способов ограничения.

Задача исследования – определение уровней перенапряжений в момент коммутации.

Классификация коммутационных перенапряжений:

- перенапряжения при включении линий;
- перенапряжения при отключении линий;
- перенапряжения при включении индуктивных элементов;
- перенапряжения при отключении индуктивных элементов;
- перенапряжения при дуговых замыканиях на землю;
- перенапряжения при отключении конденсаторных батарей.

Перенапряжения при коммутации ненагруженных линий электропередачи связаны с включениями или отключениями выключателями емкостных токов. Отключения ненагруженной линии малообъемным масляным выключателем усугубляется тем, что перекрытие ее изоляции может повлечь разрушение выключателя. Радикальной мерой борьбы с этим видом коммутационных перенапряжений является применение выключателей без опасных повторных зажиганий дуги при отключении линии. Эффективным оказывается подключение к линии шунтирующего реактора, также ограничение перенапряжений при отключении линий может осуществляться с помощью вентильных разрядников или нелинейных ограничителей перенапряжений.

При проведении исследования простейшей электрической схемы уровни перенапряжений в момент коммутации превысили номинальное напряжение и составили:

- для фазы *A* – 1200 В;
- для фазы *B* – 600 В;
- для фазы *C* – 1100 В.

### Литература

1 Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPower-Systems и Simulink / И.В. Черных. – М. : ДМК Пресс; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

2 Халилов, Ф.Х. Классификация перенапряжений. Внутренние перенапряжения / Ф.Х. Халилов. – СПб : НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2013. – 80 с.

3 Стариков, С.В. Исследование в оболочке MatLab коммутационных перенапряжений на кабельном присоединении трансформатора с элементами защиты в виде ОПН и RC-цепочки / С.В. Стариков, В.А. Чевычелов, В.И. Гуль // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Сер. 4, Энергетика. Электроэнергетика. – 2009. – № 11. – С. 47–50.

## **Математическое моделирование измерительных трансформаторов тока и их вторичных цепей**

**Башаркевич Я.В.**

**Научный руководитель – Артеменко К.И.**

Трансформатор тока (ТТ) – обычный трансформатор, сердечник и две обмотки, первичная и вторичная. Первичную обмотку, которая содержит небольшое количество витков, включают последовательно в цепь, у которой необходимо измерить ток, а к вторичной, с большим числом витков, подключают амперметр.

К конструктивным особенностям трансформатора тока относятся:

– схемы соединения вторичных обмоток – звезда с нулевым проводом, треугольник, дифференциальные схемы и т. п.;

– значения вторичных нагрузок, при необходимости с учетом их неодинаковости в различных фазах, наличия нелинейных индуктивностей в составе нагрузки и т. п.;

– характеристики намагничивания сердечника с возможностью задания остаточных индукций, учета динамики процесса перемагничивания;

– учет конструктивных особенностей – обычное или каскадное исполнение, наличие немагнитных зазоров в магнитопроводе и др.

Для питания токовых цепей РЗ применяются ТТ простейшей конструкции без каких-либо дополнительных средств уменьшения погрешностей, за исключением витковой поправки.

В переходном режиме падение напряжения в нулевом проводе оказывает существенное влияние на форму кривой вторичных токов. Поэтому математическое моделирование трехфазной группы ТТ этого вида необходимо выполнять с учетом сопротивлений нулевого провода и включенных в него нагрузок.

Трехфазная группа ТТ с соединением вторичных обмоток в треугольник находят применение в дифференциальных защитах силовых трансформаторов.

Продольная дифференциальная токовая защита электроэнергетического объекта содержит несколько трехфазных групп ТТ, имеющих общую нагрузку дифференциальной цепи. В защитах синхронных генераторов, высоковольтных электродвигателей содержится две, а в защитах сборных шин – более двух групп с соединением вторичных обмоток в звезду. Защиты силовых трансформаторов, автотрансформаторов, блоков генератор – трансформатор содержат несколько групп ТТ с разнородными схемами соединения вторичных обмоток.

В комплексных математических моделях дифференциальных защит целесообразно использовать модель токовых цепей, позволяющую задавать нужную схему соединений каждой трехфазной группы ТТ.

## **Регулирование уровней токов короткого замыкания в электроэнергетических системах**

*Башиаркевич Я.В., Зарихта К.С., Русецкий К.И.*

**Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.**

Для защиты токоведущих конструкций и их изоляции от разрушения в результате действия токов короткого замыкания (КЗ) в эксплуатации принимаются следующие меры, позволяющие регулировать уровни токов КЗ:

- модернизацию оборудования с целью получения более высоких параметров;
- токоограничивающие реакторы;
- трансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения;
- различного рода токоограничивающие устройства;
- отказ от автотрансформаторных связей;
- изменение схемы электроустановки путем переключения отдельных элементов с одной секции распределительного устройства на другую или путем дробления мощности установленных трансформаторов;
- деление сети стационарное на секционных, шиносоединительных или линейных выключателях;
- деление сети автоматическое на секционных и шиносоединительных выключателях, а также на выключателях автотрансформаторов связи распределительных устройств различных напряжений;
- заземление нейтралей части трансформаторов;
- заземление нейтралей части трансформаторов через резисторы, реакторы или устройства с нелинейными характеристиками;
- кратковременное размыкание третичной обмотки автотрансформаторов при коротких замыканиях, сопровождающихся большими токами.

На практике в зависимости от местных условий для ограничения уровней токов КЗ может быть принят один или несколько из перечисленных выше способов. Принимаемое решение должно иметь соответствующее технико-экономическое обоснование, включая анализ возможных режимов и показателей надежности работы электроустановки, условий оперативных переключений в схеме при аварийных ситуациях, а также условий последующего расширения электроустановки и реконструкции распределительных устройств.

Стационарное и автоматическое деление сетей в эксплуатации является вынужденным решением в условиях отсутствия эффективных серийно поставляемых электропромышленностью токоограничивающих устройств. Поэтому деление сети должно рассматриваться как внутренний резерв энергосистем.



## **Моделирование броска тока намагничивания силовых трансформаторов в среде Simulink MatLab**

*Бойков А.Д.*

**Научный руководитель – Артеменко К.И.**

Пакет расширения SimPowerSystems является распространенным инструментом для моделирования электротехнических устройств в системе MatLab Simulink. Представлена модель силового трехфазного двухобмоточного трансформатора из библиотеки SimPowerSystem. В библиотеке данного пакета имеется несколько моделей трансформаторов – линейных и нелинейных, одно- и трехфазных, двух- и трехобмоточных. Особый интерес представляет модель трехфазного двухобмоточного трансформатора, которая является важнейшим элементом как для моделирования энергосистемы любого уровня сложности, так и для проверки работоспособности современных устройств релейной защиты и автоматики. Данная модель основана на использовании каталожных данных силового трансформатора. Основное внимание уделено характеристикам намагничивания стали магнитопровода для модели силового трансформатора. Для всех трансформаторов из библиотеки Simulink-SimPowerSystems параметры схемы замещения задаются в относительных единицах (о. е. в зарубежных источниках р. у.). В более поздних версиях программы появляется возможность задавать параметры в именованных единицах, однако преимущества относительных единиц общеизвестны и при отсутствии известной мощности трансформатора не будет большой ошибкой взять средние значения из известного диапазона. Например, для трансформаторов мощностью от 300 кВ·А до 300 МВ·А индуктивное сопротивление обмоток находится в диапазоне от 0,03 до 0,12 о. е., а активное сопротивление обмоток – от 0,002 до 0,005 о. е.

В ходе моделирования были воссозданы процессы, протекающие в магнитопроводе ненагруженного трансформатора, включаемого под напряжение. Как и ожидалось, при включении трансформатора на холостой ход возникает значительный бросок тока. В момент включения он в несколько раз превышает номинальный ток трансформатора и сопровождается высоким уровнем аperiodической составляющей и второй гармоники. Осциллограммы броска тока намагничивания, полученные в ходе моделирования с использованием рассматриваемого трансформатора, подтвердили адекватность модели.

Подытоживая результаты работы можно сказать следующее:

– Экспериментально доказаны высокие значения бросков тока в магнитопроводе силового трансформатора.

– Получены осциллограммы броска тока намагничивания для каждой фазы.

#### **Литература**

1 Новожилов, М.А. MatLab в электроэнергетике : учеб. пособие / М.А. Новожилов. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2008. – 208 с.

2 Новгородцев, А.Б. Расчет электрических цепей в MatLab : учебный курс / А.Б. Новгородцев. – СПб. : Питер, 2004. – 250 с.

3 Дьяконов, В.П. MatLab 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5/. Основы применения : Полное руководство пользователя / В.П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.

4 Новаш, И.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода / И.В. Новаш, Ю.В. Румянцев // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2015. – № 1. – С. 5–11.

## **Расчет токов короткого замыкания при помощи программы TKZdo1kV**

*Бурло В.В., Зарихта К.С.*

**Научный руководитель – доцент Бобко Н.Н.**

Электрические сети напряжением до 1 кВ формируют системы внутреннего электроснабжения цехов промышленных предприятий и гражданских зданий.

Внутренние сети цехов и гражданских зданий запитываются от трансформаторных подстанций 6–10/0,4–0,23 кВ.

Наружные сети до 1 кВ на промышленных предприятиях имеют весьма ограниченное применение, так как электропитание цеховых нагрузок выполняется от внутрицеховых, встроенных или пристроенных трансформаторных подстанций.

В городах наружные электрические сети до 1 кВ значительны, так как нагрузки гражданских зданий запитываются в основном от отдельно стоящих трансформаторных подстанций.

Кроме того, к ним относятся также сети наружного освещения. Основное назначение сетей до 1 кВ является распределение электрической энергии внутри цехов, зданий и непосредственное питание электроприемников. Эти сети относятся к низшим уровням систем электроснабжения и характеризуются значительным разнообразием и большими объемами информации.

При проектировании электрической сети следует предусматривать, возможность организации технического учета расхода электроэнергии, позволяющего формировать расход электроэнергии на единицу выпускаемой продукции или работы; возможность промышленных способов ее монтажа, предполагающих применение комплектных устройств, прокладку кабелей, проводов в лотках, и коробах. Целью расчета токов короткого замыкания (КЗ) в сетях до 1 кВ является проверка выбранных автоматов и шинопроводов на стойкость действия токов КЗ всех видов защитных аппаратов (автоматов и предохранителей) – по предельному току отключения и на чувствительность защит.

Для проверки защитных аппаратов по предельному току КЗ. определяют максимальное значение тока трехфазного КЗ, а для проверки чувствительности защит определяют минимальное значение тока однофазного КЗ в электрически удаленной от источника питания точке сети.

Токи КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ рекомендуется рассчитывать в именованных единицах. При составлении эквивалентных схем замещения параметры элементов исходной расчетной схемы следует при-

водить к ступени напряжения сети, на которой находится точка КЗ, а активные и индуктивные сопротивления всех элементов схемы замещения выражать в миллиомах.

Программа TKZdo1kV предназначена для расчета токов короткого замыкания в схемах собственных нужд электрических станций и подстанций напряжением до 1 кВ. Программа применяется в операционной среде Windows XP с SP2 и выше и с Microsoft Office 2002 и выше.

Программа обеспечивает расчет токов КЗ в соответствии с требованиями.

Исходя из требований к расчету токов КЗ, изложенных в стандартах, можно выделить особенности, которыми должны обладать алгоритмы расчета тока КЗ:

- учет активных сопротивлений элементов схемы замещения;
- учет дуги в месте повреждения для расчета минимальных значений токов короткого замыкания;
- учет подпитки места КЗ от асинхронных электродвигателей (АД);
- учет термического эффекта тока КЗ.

Требования ГОСТ учтены в методических указаниях и в алгоритме разработанной компьютерной программы TKZdo1kV.

Все параметры схемы замещения и все параметры режима КЗ представляются в комплексной форме.

#### **Литература**

1 Руководящие указания по расчету тока короткого замыкания и выбору электрооборудования : РД 153-34.0-20.527-98 : утв. Департаментом стратегии развития и научно-технической политики 23.03.98. – М. : ЭНАС, 2002. – 152 с.

2 Бобко, Н.Н. Программа TKZdo1kV для расчета токов короткого замыкания на ЭВМ / Н.Н. Бобко. – Минск : БНТУ, 2007. – 24 с.

## Выбор электрических кабелей

*Бухтик Е.П.*

Научный руководитель – к.т.н., доцент Губанович А.Г.

Кабельная линия электропередачи – линия для передачи электроэнергии, состоящая из одного или нескольких параллельных кабелей с соединительными, стопорными и концевыми муфтами и крепежными деталями. Как правильно, кабельные линии прокладывают в местах, где затруднено строительство воздушных линий.

Силовые кабели предназначены для передачи по ним на расстояние электроэнергии, используемой для питания электрических установок.

Силовые кабели состоят из следующих основных элементов: токопроводящих жил, изоляции, оболочек и защитных покровов. Помимо основных элементов в конструкцию силовых кабелей могут входить экраны, нулевые жилы, жилы защитного заземления и наполнители.

Расшифровка букв:

– буква № 1 характеризует материал жилы. Алюминию присваивается буква «А», меди буква не присваивается;

– буква № 2 в маркировке характеризует вид провода либо материал оболочки кабеля;

– буква № 3 характеризует материал для изоляции жил;

– буква № 4 характеризует особенность конструкции.

Расшифровка цифрового обозначения:

– цифра № 1 всегда указывает количество жил, если в маркировке провода либо кабеля цифра перед буквами отсутствует, значит, проводник одножильный;

– цифра № 2 характеризует площадь поперечного сечения в мм<sup>2</sup>;

– цифра № 3 отображает номинальное напряжение сети.

При рассмотрении режима короткого замыкания необходимо кроме расчета проводников по температуре производить расчет электродинамических усилий, возникающих в проводниках. Для выбора термически стойкого сечения жил кабеля необходимо знать максимальный установившийся ток короткого замыкания из соответствующего расчета  $I_{кз}$  и возможное время прохождения этого тока через кабель, определяемое аппаратом защиты  $t_{заш}$ .

Выбор сечения проводов и кабелей без учета экономических факторов может привести к значительным потерям электрической энергии в линиях и существенному возрастанию эксплуатационных расходов. По этой причине сечение кабелей электрических сетей внутреннего электроснабжения значительной протяженности, а также сетей, работающих с большим чис-

лом часов использования максимума нагрузки  $T_{\max} > 4000$  ч – должно быть не менее отвечающего рекомендованной экономической плотности тока, устанавливающей оптимальное соотношение между капитальными затратами и эксплуатационными расходами.

Выбор сечения из условий допустимого нагрева сводится к пользованию соответствующими таблицами длительно допустимых токовых нагрузок  $I_d$  при которых токопроводящие жилы нагреваются до предельно допустимой температуры, установленной практикой так, чтобы предупредить преждевременный износ изоляции.

#### **Литература**

1 Пантелеев, Е.Г. Монтаж и ремонт кабельных линий : справочник электромонтажника / Е.Г. Пантелеев, А.Д. Смирнова. – 2-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

2 Белоруссов, Н.И. Электрические кабели, провода и шнуры : справочник / Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян. – 5-е изд. – М. : Энергия, 1987. – 536 с.

3 Привезенцев, В.А. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии / В.А. Привезенцев, Э.Т. Ларина. – М. : Энергия, 1970. – 425 с.

## **Инвертор с амплитудно-импульсной модуляцией выходного напряжения**

*Валов Ю.Г.*

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Мороз Р.Р.**

Преобразование параметров электрической энергии на современном этапе технического развития занимает одно из важнейших мест, т. к. интенсивное развитие средств автоматики, телемеханики, электроизмерительной и вычислительной техники порождает многообразие требований, предъявляемых к источникам их питания.

Инверторы служат для преобразования электрической энергии постоянного тока в электрическую энергию переменного тока. Принцип работы инвертора основан на усилении эталонного синусоидального напряжения маломощного задающего генератора. Одним из основных требований, предъявляемых к источникам гарантированного питания, является обеспечение синусоидальной формы выходного напряжения, его стабилизации и высокие технико-экономические показатели. Если на высоких частотах порядка 400–1000 Гц эти требования сравнительно легко выполняются применением схемы инвертора с фильтром на выходе, то на промышленных частотах обеспечение приемлемых весогабаритных показателей становится затруднительным.

Из всего многообразия методов улучшения технико-экономических показателей инвертора наиболее приемлемым и перспективным можно считать метод амплитудно-импульсной модуляции напряжения. Такой вид модуляции даёт возможность достичь хорошего гармонического состава выходного напряжения уже при нескольких прямоугольных импульсах в полупериоде, а следовательно, уменьшить вес и габариты выходного фильтра. Если для согласования напряжения питания и нагрузки необходимо применение силового трансформатора, то наименьшими весогабаритными показателями будет обладать схема с переключением вторичных обмоток трансформатора тиристорными ключами, поскольку в этом случае рабочая частота трансформатора повышается в несколько раз. Причём наращивая вторичные обмотки с ключами, можно получить напряжение с любым числом ступеней и обеспечить тем самым заданный уровень коэффициента гармоник. Такой метод формирования выходного напряжения наиболее эффективен для получения напряжения улучшенной формы в диапазоне часто от единиц до сотен герц. При этом стабилизация выходного напряжения довольно просто решается непосредственно в самом инверторе путём регулирования ширины ступеней выходного напряжения, что также способствует снижению веса и габаритов инвертора.

Из гармонического анализа напряжения с амплитудно-импульсной модуляцией известно, что одним из лучших по подавлению гармоник, близких к основной, является импульсное напряжение, модулированное по синусоидальному закону, с чётным числом импульсов в полупериоде (рисунок 1).

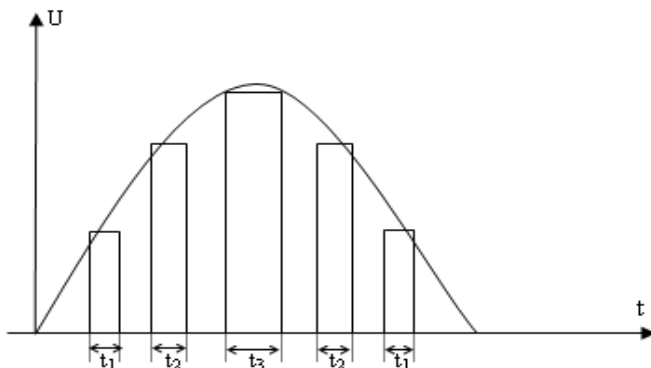


Рисунок 1 – График зависимости импульсного напряжения, модулированного по синусоидальному закону

Здесь каждый импульс характеризуется величиной  $U_m$  и длительностью  $\Delta t$ , которые определяются выбранной глубиной модуляции.

С уменьшением длительности импульсов  $\Delta t$  меняются амплитуды гармоник, уже имеющих в спектре, что очень важно при стабилизации напряжения, поскольку при регулировании величины выходного напряжения инвертора не появляются гармоники, близкие к основной.

Кроме того, рассматриваемая система амплитудно-импульсной модуляции напряжения позволяет получать одновременно напряжения разных частот в зависимости от применяемых вторичных схем преобразования. Например, при первичной несущей частоте напряжения 400 Гц на каждом из выводов источника можно получить одновременно напряжения ряда частот: 400, 300, 200, 150, 100, 50 Гц и т. д.

Таким образом, система с амплитудно-импульсной модуляцией напряжения позволяет получить на выходе инвертора стабилизированные напряжения синусоидальной формы разных частот при значительном уменьшении веса и габаритов источника в целом для заданного коэффициента нелинейных искажений.



## **Программа для расчета токов короткого замыкания ТК315**

*Вишеватый А.Д., Русецкий К.И., Зарихта К.С.*

**Научный руководитель – доцент Бобко Н.Н.**

Программа ТК315 предназначена для расчетов токов короткого замыкания (КЗ). Она ориентирована на учебный процесс и предназначена для расчета токов КЗ при выполнении курсовых и дипломных работ. Программа дает возможность рассчитать полное значение периодической составляющей сверхпереходного тока всех видов КЗ, симметричные составляющие этого тока и распределение их по ветвям схемы. Расчет несимметричных КЗ выполняется на основе метода симметричных составляющих трехфазной схемы.

Нормальный режим работы энергосистемы и режим трехфазного КЗ являются симметричными. В этих режимах протекают только токи прямой последовательности. В несимметричном режиме в месте несимметрии возникают токи и напряжения обратной и нулевой последовательности.

Расчет режима КЗ выполняется как расчет установившегося режима в схеме замещения, построенной для сверхпереходного режима. Математической моделью этого режима является модель на основе узловых уравнений. Свертка схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей для заданного узла КЗ выполняется на основе формул преобразования многолучевых звезд в полные многоугольники.

Для расчета токов КЗ с помощью программы ТК315 необходимо составить файл входных данных, в котором будет отображена информация о расчетной схеме. Входными данными являются параметры схемы замещения в относительных или именованных единицах в комплексной форме.

Для построения схемы замещения узлы расчетной трехфазной системы нумеруются целыми цифрами в произвольном порядке. Для каждой ветви схемы замещения прямой последовательности задаются номера двух узлов, ЭДС и сопротивление. Узлам, которые соответствуют нейтралю обмоток генераторов и нагрузок (соединенных по схеме звезда) в схеме замещения прямой последовательности, присваивается номер 0 и потенциал этих узлов принимается равным нулю.

На основе построенной схемы замещения создается файл входных данных. Этот файл имеет имя в виде AAAA.dat, которое после работы программы ТК315 присваивается файлу результатов расчета.

Информация в файле входных данных представлена в виде четырех блоков:

– блок общих данных;

- блок данных о ветвях схемы прямой последовательности;
- блок данных об узлах КЗ;
- блок данных о ветвях схемы нулевой последовательности (когда она задается во входных данных).

В блоке общих данных приводится следующая информация о схеме замещения:

– признак единиц измерения, в которых построена схема замещения: (0 – относительные единицы; 1 – именованные единицы);

– признак наличия схемы замещения нулевой последовательности во входных данных: (0 – схема замещения нулевой последовательности отсутствует; 1 – схема замещения нулевой последовательности присутствует);

– признак вывода симметричных составляющих токов КЗ в ветвях схемы во входной файл: (0 – не выводятся; 1 – выводятся токи прямой последовательности; 2 – выводятся токи обратной последовательности; 3 – выводятся токи нулевой последовательности; 12 – выводятся токи прямой и обратной последовательностей; 13 – выводятся токи прямой и нулевой последовательностей; 23 – выводятся токи обратной и нулевой последовательностей; 123 – выводятся токи прямой, обратной и нулевой последовательностей);

– количество ветвей в схеме замещения прямой последовательности;

– количество узлов короткого замыкания;

– количество ветвей в схеме замещения нулевой последовательности (задается равной нулю, когда признак наличия схемы замещения нулевой последовательности был задан равным нулю);

– количество узлов схемы замещения нулевой последовательности, которые имеют нулевой потенциал (задается равным 0, когда признак наличия схемы замещения нулевой последовательности был задан равным нулю);

– базисная мощность, МВА (комплексный вид), задается равной (1., 0.), когда признак единиц измерения был задан равным 1.

В блоке данных о ветвях схемы прямой последовательности записываются следующие данные: номер узла начала и конца ветви, ЭДС и сопротивление ветви.

Блок данных об узлах КЗ несет в себе информацию о номере узла КЗ, а также базисном напряжении в этом узле, кВ.

В последнем блоке описывается информация о схеме замещения нулевой последовательности. В первой группе для каждой ветви схемы замещения нулевой последовательности записываются три цифры: номера начала и конца ветвей и сопротивления этих ветвей. Вторая группа информации об узлах схемы замещения нулевой последовательности, которые

имеют нулевой потенциал, представляет собой массив номеров узлов схемы замещения нулевой последовательности, которые имеют нулевой потенциал в схеме нулевой последовательности.

Программа ТК315 после ввода входных данных выдает файл результатов расчета, содержащий информацию, прочитанную из файла входных данных. В выходной файл выводятся результаты расчетов тока КЗ. Для каждого заданного узла КЗ производится циклический повтор расчетов по программе и вывод результатов в выходной файл.

Программа ТК315 рассчитывает токи КЗ по такому же алгоритму, что и при расчете вручную, однако сложность ввода входных данных не позволяет применять данную программу для расчетов объемных схем, поэтому программу можно использовать только в целях расчета курсового или дипломного проектов.

### **Литература**

1 Руководящие указания по расчету тока короткого замыкания и выбору электрооборудования : РД 153-34.0-20.527-98 : утв. Департаментом стратегии развития и научно-технической политики 23.03.98. – М. : ЭНАС, 2002. – 152 с.

2 Бобко, Н.Н. Программа ТК315 для расчета токов короткого замыкания на ЭВМ / Н.Н. Бобко. – Минск : БНТУ, 2016. – 14 с.

## Современные датчики тока

*Власюк И.А.*

**Научный руководитель – к.т.н. Булойчик Е.В.**

На протяжении долгого времени в электроэнергетике в качестве основных первичных преобразователей для нужд релейной защиты и автоматики использовались электромагнитные трансформаторы тока (ТТ). В настоящее время эта тенденция продолжается, однако активно разрабатываются измерительные преобразователи на абсолютно новых принципах.

На современном этапе развития электроэнергетики при повсеместном использовании электрооборудования и электроприборов наиболее актуальным является достоверное измерение силы тока для обеспечения высокой надежности и безопасности промышленных систем и сетей. Для осуществления мониторинга и диагностики цепей, запуска схем защиты, обнаружения отказов электрооборудования и аварийных состояний различных типов нагрузки применяются различные типы преобразователей тока. Достоинства и недостатки различных типов преобразователей тока определяют области их применения.

Высоковольтные трансформаторы тока имеют следующие достоинства и недостатки.

Достоинства:

- высокий класс точности – 0,2–0,5S. В лабораторных ТТ, где нет высоковольтной изоляции, достигим класс точности 0,1S и выше;
- простота и надежность ТТ в сетях 6–10–35 кВ;
- температурная стабильность характеристик ТТ.

Недостатки:

- насыщение магнитопровода электромагнитного ТТ аperiodической составляющей тока короткого замыкания (КЗ) и отсутствие передачи информации о первичном токе в первые периоды аварийного переходного процесса, когда эта информация наиболее необходима системам РЗА и ПА для успешной локализации и ликвидации аварии (погрешности трансформации тока электромагнитными ТТ достигают в этом режиме 90 %);
- высокая аварийность из-за проблем с изоляцией;
- взрыво- и пожароопасность трансформаторов с масляной изоляцией (взрывоопасность в элегазовых ТТ сохраняется).

Несимметричное искажение формы кривой вторичного тока ТТ под действием аperiodической составляющей в первичном токе КЗ имеет важных следствия:

- информация о первичном токе фактически перестает поступать по вторичным цепям на системы РЗА и ПА через 10 миллисекунд после нача-

ла аварии, причем сильно искажена не только апериодическая составляющая тока КЗ, но и периодическая тоже, примерно на 90 % во втором периоде (через 5–10 периодов (100–200 миллисекунд) трансформация первичного тока восстановится);

– в этих условиях системы релейной защиты должны выделить самое начало переходного процесса и по производной первой четверти периода предсказать форму кривой тока КЗ, в противном случае устройства релейной защиты (и микропроцессорные и старые) либо не работают, либо работают ложно, либо просто затягивают процесс до появления информации, хотя по регламенту системы РЗА должны за один-два периода определять место аварии и выдавать команды на соответствующие высоковольтные выключатели для локализации и ликвидации аварии в начальной стадии;

– затягивание ликвидации аварии чревато выпадением из синхронизма крупных электрических двигателей и генераторов на заводах и электростанциях, что превращает простую аварию в системную.

В настоящее время находят применения оптические трансформаторы тока на эффекте Фарадея в микропроцессорных устройствах, они имеют ряд достоинств:

- широкий диапазон снимаемых данных;
- отсутствием явлений гистерезиса, магнитного насыщения и остаточного намагничивания;
- возможность интеграции в измерительные и информационные системы с использованием различных интерфейсов – аналоговых, дискретных и цифровых;
- полная эколого-, пожаро-, взрыво- и электробезопасность;
- высокая помехоустойчивость.

Однако данный принцип измерения не лишен недостатков. Сам по себе эффект Фарадея является косвенным, так как не проявляется в вакууме и зависит от свойств среды, что приводит к погрешности обусловленной изменением температуры, механических напряжений и вибрации оптического волокна. Следует отметить, что на текущий момент практически отсутствует опыт эксплуатации таких преобразователей.

### **Литература**

1 Линт, Г.Э. Серийные реле защиты, выполненные на интегральных микросхемах / Г.Э. Линт // Библиотека электромонтера. – 1977. – С. 38–46.

2 Цытович, Л.И. Датчики напряжения (тока) с повышенной временной и температурной стабильностью характеристик / Л.И. Цытович // Энергетика. – 2009. – № 34. – С. 45–50.

3 Лебедев, В.Д. Измерительные преобразователи тока для цифровых устройств релейной защиты и автоматики / В.Д. Лебедев // Энергетика. – 2009. – № 18. – С. 3–8.

## **Миниатюризация и повышение надёжности электротехнических устройств**

*Дайнеко А.В.*

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Мороз Р.Р.**

Современным направлением в разработке электротехнических устройств является миниатюризация устройства в целом и повышение его надёжности. Миниатюризация электротехнических устройств требует комплексного решения основных взаимосвязанных проблем: энергетических, структурных, конструктивно-технологических, организационных.

Энергетические проблемы заключаются в получении достаточно высокого КПД, чтобы рассеиваемая мощность не требовала дополнительных поверхностей охлаждения. Увеличение площадей охлаждения поверхностей значительно ухудшает весо-габаритные показатели устройства. Энергетические проблемы решаются для двух классов устройств: непрерывного действия и импульсных. Больше возможностей миниатюризации имеют импульсные устройства, где потери в основном определяются потерями в полупроводниковых приборах. Уменьшению потерь в этих устройствах способствует повышение напряжения источника питания.

Структурные проблемы миниатюризации заключаются в исключении или уменьшении количества и установленной мощности реактивных элементов: трансформаторов, дросселей и конденсаторов. В этот метод миниатюризации входят такие проверенные практикой приёмы как применение интегральных операционных усилителей, применение активных фильтров вместо реактивных, высокочастотных преобразователей или введение в схему устройства промежуточных преобразователей высокой частоты, применение оптимальных схем силовых переключающих устройств и др.

Конструктивно-технологические проблемы предполагают применение микросхем, разработку и внедрение интегрально-гибридных устройств. Значительные возможности в этом плане открываются с применением силовых МДП-транзисторов, имеющих очень высокие энергетические показатели в ключевом режиме.

Системные проблемы миниатюризации впервые возникают при миниатюризации сложных устройств, которые представляют собой совокупность взаимосвязанных элементов и узлов.

Организационные проблемы миниатюризации являются следствием конструктивно-технологических и системных методов. Сущность заключается в необходимости достаточного уровня интеграции и системного проектирования.

Рассматривая основные проблемы миниатюризации, можно сделать вывод о необходимости комплексного подхода к проектированию электротехнических устройств, рассматривая их как систему устройств, связанных по единому плану. При этом последовательное решение проблемы или системы проблем является совершенно неприемлемым, так как звенья системы взаимосвязаны и очень часто находятся в противоречии друг с другом. Отсюда возникает необходимость поиска оптимального варианта, обеспечивающего высокие показатели всего устройства в целом.

Необходимо отметить, что понятие оптимизации очень объёмно, так как может характеризоваться широким кругом показателей, или критериев оптимальности. Оценка многочисленных разработанных вариантов не даёт возможность однозначно определить требуемый для заданных условий вариант, так как установившиеся критерии оптимальности практически отсутствуют. Оптимизация заключается в определении структуры схемы и параметров элементов по многочисленным критериям, отражающим важнейшие требования к проектируемому устройству. Одним из основных требований к преобразователям напряжения является решение проблемы оптимизации для сложной схемы инвертора, включающего цепи, как с аналоговым, так и с дискретным преобразователем входного напряжения.

## Энергогенерация на биотопливе

*Данильчук В.В., Путь А.В.*

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Бокун И.А.**

Использование биотоплива в качестве топлива на мини-ТЭЦ и котельной помимо экономического эффекта, достигаемого за счет вытеснения импортируемого газа, вызовет еще и значительный социально-экономический эффект. Энергоснабжение потребителей может осуществляться по двум принципиально различным схемам: комбинированной (тепло и электроэнергия получают от одного источника – ТЭЦ.) и отдельной (тепло отпускается от котельной, а электроэнергия от КЭС).

Основная часть биотоплива, которая может быть вовлечена в топливно-энергетический баланс для промышленной выработки электроэнергии и тепла – это древесно-топливные ресурсы. В Беларуси леса занимают около 42 % территории республики. Запас растущей древесины составляет свыше 1,2 млрд. м<sup>3</sup>.

Перспективным по современным европейским показателям является перевод теплоэнергетики не на использование щепы и опилок, а на древесные топливные гранулы (пеллеты) – продукт наиболее глубокой переработки отходов древесной массы. Пеллеты производятся из древесных отходов: опилок, стружки, щепы любой породы древесины (хвойные, лиственные), а также из коры. Тепло, получаемое за счет сжигания топливных гранул, дешевле получаемого из дров, угля, мазута, дизельного топлива.

### Литература

1. Бокун, И.А. Возобновляемые и нетрадиционные источники энергии / И.А. Бокун, А.М. Темичев. – Минск, 2004.



## **Эффективное использование ветроэнергетики в Республике Беларусь**

*Деялтовская Л.А., Мачульская В.Д.*

**Научный руководитель – к.э.н., доцент Нагорнов В.Н.**

В Республике Беларусь, как и во всем мире, значительное внимание уделяется развитию ветроэнергетических установок. В настоящее время наиболее эффективными источниками энергии являются ветряные установки с горизонтальным ротором, т. к. для ветроэнергетики Беларуси энергетический ресурс ветра практически неограничен.

В стране имеется развитая централизованная электросеть, большое количество свободных площадей, не занятых субъектами хозяйственной деятельности, которые могут быть использованы для ветроустановок. На территории Республики Беларусь выявлено 1840 площадок для размещения ветроустановок с возможным энергетическим потенциалом 1600 МВт и годовой выработкой электроэнергии 2,4 млрд. кВт·ч.

В настоящее время в Республике Беларусь действует несколько опытно-промышленных ветроэнергетических установок (ВЭУ), 2 ВЭС, одна из которых в составе двух установок мощностью 250 и 600 кВт и ВЭС 9 МВт. Беларусь располагает ресурсами, достаточными для обеспечения не менее 10 % собственного потребления электроэнергии при полной окупаемости затрат.

Ветроэнергетические установки можно классифицировать по взаимному положению оси ветроколеса и направлению воздушного потока (горизонтально – осевые, вертикально – осевые). В Беларуси наибольшее применение имеют установки с горизонтальной осью вращения. Они имеют 2- или 3-полостных колеса. Мощность установок зависит от диаметра, формы и профиля колеса. Принцип их работы заключается в преобразовании энергии ветра во вращательное движение турбины, которая находится в гандоле. Это происходит при помощи лопастей (ротора). Ветер следует контуру лопасти, приводя их во вращение. Конструкция может работать при скорости ветра в среднем 4 м/с. При достижении скорости 25 м/с ВЭС автоматически выключается. Бесконтрольное вращение при сильном ветре является причиной аварий и разрушений ветряка.

Ветроэнергетика обеспечивает получение экологически чистой электроэнергии без экологических рисков и выбросов парниковых газов, радиоактивных материалов, без необходимости захоронения отходов, многолетнего мониторинга после закрытия, как того требует, например, ядерная энергетика, но существуют некоторые экологические проблемы влияния ВЭУ на человека и фауну, требующие особого внимания и оценки.

Экономическая эффективность использования ВЭУ для энергоснабжения небольших потребителей определяется ветроэнергетическим потенциалом, тарифом на электроэнергию у потребителя, стоимостью используемой ВЭУ, и др. Общая прибыль от использования ВЭУ может быть определена как ежегодная прибыль от сэкономленной электроэнергии, произведенной установкой, за период в течение срока полезного использования.

Экономика проектов ВИЭ в сравнении с традиционной энергетикой характеризуется короткими сроками проектирования и строительства, низкими (и снижающимися) удельными капитальными вложениями, а также невысокой себестоимостью кВт·ч.

В Беларуси себестоимость производства 1 кВт·ч электроэнергии на ВЭС составляет порядка 6–10 центов, срок окупаемости равен 5–13 годам. Эти значения зависят от количества часов использования установленной мощности. Из этого можно сделать вывод, что ВЭС достаточно критична к этому параметру, в связи с этим, следует стремиться к увеличению данного параметра, что можно достичь подбором зон, где имеется достаточно большая ветровая нагрузка либо стоит увеличить высоту мачты ветроустановки до 140–150 метров.

## Нелинейные ограничители перенапряжений

*Дударев А.В.*

**Научный руководитель – к.т.н. Дерюгина Е.А.**

Ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) – электрические аппараты, предназначенные для защиты оборудования систем электропитания от коммутационных и грозовых перенапряжений. Основным элементом ОПН является нелинейный резистор – варистор (varistor, от англ. Vari(able) (Resi)stor – переменное, изменяющееся сопротивление).

В настоящее время варисторы для ограничителей изготавливаются как цилиндрические диски диаметром 28–150 мм, высотой 5–60 мм. На торцевой части дисков методом металлизации наносятся алюминиевые электроды толщины 0,05–0,30 мм. Боковые поверхности диска покрывают глифталевой эмалью, что повышает пропускную способность при импульсах тока с крутым фронтом.

Применяемые в настоящее время разрядники с резисторами, имеющими недостаточную нелинейность, часто не позволяют обеспечить необходимое ограничение перенапряжений. Более глубокое снижение перенапряжений требует уменьшения нелинейного последовательного сопротивления, что приводит к существенному увеличению сопровождающих токов. Включение нелинейных сопротивлений на рабочее напряжение без искровых промежутков оказывается невозможным вследствие большого тока через нелинейное сопротивление при фазном напряжении.

Применение искровых промежутков вызывает дополнительные трудности, связанные с необходимостью уменьшения сопровождающего тока до величины, надежно отключаемой промежутками. Значительное улучшение защитных характеристик разрядников может быть достигнуто при отказе от использования искровых промежутков. Это оказывается возможным в ОПН при использовании резисторов с резко нелинейной вольт-амперной характеристикой. Выполненные на основе окиси цинка варисторы отвечают этим требованиям и применяются в ограничителях перенапряжений. ОПН комплектуются из большого числа последовательно и параллельно соединенных окисно-цинковых варисторов. Число последовательно соединенных в колонку варисторов и число параллельных колонок в ограничителе перенапряжений определяется номинальным напряжением сети и зависит от требований к защитному уровню напряжения и пропускной способности ограничителей по току. Пропускная способность ОПН и характер их повреждения зависят от амплитуды и длительности протекающего через них тока. При импульсах тока большой длительности, характерных для коммутационных перенапряжениях, наблюдается суше-

венных нагрев ОПН, в результате так воздействий может происходить проплавление в варисторах сквозных отверстий и их разрушение при токах с амплитудой 80–120 А. При кратковременных импульсах тока, характерных для грозовых перенапряжений, варисторы не разрушаются даже при воздействии импульсов с амплитудой 1000–1500 А. Дальнейшее увеличение тока может приводить к их перекрытию по боковой поверхности, однако, ток перекрытия может быть значительно увеличен, если покрыть боковую поверхность варисторов специальным изоляционным лаком или залить колонку варисторов полимерным компаундом.

#### **Литература**

- 1 Дмитриев, М.В. Параметры ограничителей перенапряжения / М.В. Дмитриев. – М. :Энергоатомиздат, 2002. – 205 с.
- 2 Поляков, В.С. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений / В.С. Поляков. – М. :Энергоатомиздат, 2002. – 272 с.
- 3 Дмитриев, М.В. Применение ОПН в электрических сетях / М.В. Дмитриев. – М. :Энергоатомиздат, 2003. – 311 с.

## **Автоматическое гашение поля генераторов и компенсаторов**

*Елисеев В.С., Волов Р.А.*

**Научный руководитель – Климкович П.И.**

В соответствии с правилами устройства электроустановок в цепи возбуждения каждого синхронного генератора и синхронного компенсатора (за исключением малых машин) устанавливаются устройства для быстрого и безопасного развозбуждения – автоматы гашения поля (АГП).

Гашение поля синхронного генератора – это операция, заключающаяся в снижении магнитного потока машины до величины близкой к нулю, которая проводится как при плановых, так и при аварийных отключениях генератора от сети. Необходимость в аварийном отключении генератора от сети возникает при повреждениях в энергосистеме, при повреждениях в зоне действия дифференциальной защиты генератора или блока генератор-трансформатор. Кроме того, машина при близком КЗ испытывает динамический удар, и силы, возникающие при этом, стремятся отогнуть лобовые части статорной обмотки, что может привести к дополнительному повреждению изоляции этих частей и дорогостоящему ремонту.

Как правило, для гашения поля используют контур возбуждения генератора, поскольку напряжение на обмотке возбуждения (ОВ) является единственным параметром, который одновременно влияет на время гашения поля и, в то же время, является доступным для воздействия на него при гашении поля в различных условиях. На ОВ при гашении поля создается отрицательное напряжение, под действием которого ток возбуждения машины снижается до нуля. Чем выше значение этого напряжения, тем быстрее гасится поле.

На сегодняшний день применяются следующие способы гашения поля:

- гашение поля выводом энергии в сеть переменного напряжения (в тиристорных системах возбуждения);
- гашение поля рассеиванием энергии магнитного поля ОВ на дугогасительной решетке выключателя;
- гашение поля рассеиванием энергии на резисторе с линейным сопротивлением и на резисторе с нелинейным сопротивлением.

### **Литература**

- 1 Брон, О.Б. Автоматы гашения магнитного поля / О.Б. Брон. – М. : Госэнергоиздат, 1961. – 138 с.
- 2 Гольдштейн, М.Е. Вентильные системы возбуждения синхронных генераторов и компенсаторов : Учебное пособие / М.Е. Гольдштейн. – 2-е изд. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 1999. – 100 с.

## **Проблемы энергетической безопасности Республики Беларусь и пути их решения**

*Елисеева А.И., Шумский А.Н.*

**Научный руководитель – к.э.н., доцент Манцерова Т.Ф.**

Проблемы энергетической безопасности становятся в последнее время все более актуальными во многих странах. Это вполне оправданно, потому что энергетика является одной из базовых отраслей в экономике любой страны, от состояния и развития которой зависит продуктивность всего хозяйственного механизма.

Энергетическая безопасность – состояние защищенности граждан, общества, государства, экономики от угроз дефицита в обеспечении их потребностей в энергии экономически доступными энергетическими ресурсами приемлемого качества, от угроз нарушения бесперебойности энергообеспечения.

Энергетика – одна из основных отраслей национальной экономики Республики Беларусь. Несмотря на то, что энергетика Беларуси надёжно функционирует и представляет собой постоянно развивающийся высокотехнологичный комплекс, на сегодняшний день существует ряд проблем (угроз) снижающих уровень энергетической безопасности страны.

Главной проблемой является слабая обеспеченность страны собственными топливно-энергетическими ресурсами (15 % общего объема потребления), что свидетельствует энергетической несамостоятельности страны.

Отсюда вытекает и проблема сильной зависимости страны от внешних поставок энергоресурсов (85 % общего потребления). Проблема усугубляется ещё и тем, что сохраняется преобладающая зависимость от одного поставщика энергоносителей – Российской Федерации.

Следующая угроза – это низкая степень диверсификации импортируемых видов топлива. Республика Беларусь оказалась одной из немногих стран в мире, которая, не обладая собственными месторождениями природного газа, значительно нарастила его долю в первичном энергопотреблении. (61,5 % в валовом потреблении ТЭР).

Не менее важной является и проблема высокой энергоёмкости экономики страны. Показатель энергоёмкости ВВП Республики Беларусь (отношение валового объема используемых ТЭР к объему ВВП) в 1,2 раза выше мирового среднего уровня этого показателя.

Существует и проблема эффективности инфраструктуры электроэнергетического сектора, связанная с транспортировкой и распределением электрической и тепловой энергии. Вследствие износа кабелей, трубопроводов, оборудования эксплуатируемых при передаче и распределении

электрической и тепловой энергии наблюдаются потери данных видов энергии. Так доля потерь электроэнергии по Республике составила 8,92 % от отпущенной, а доля потерь тепловой энергии – 9,16 %.

Энергетическая безопасность страны требует создания механизма надежного и эффективного энергообеспечения всех отраслей экономики и населения.

Поэтому для повышения уровня энергетической безопасности Республики Беларусь и минимизации угроз необходимо принять ряд мер.

Проблема энергетической несамостоятельности страны должна решаться с учетом максимально возможного вовлечения в топливно-энергетический баланс местных энергоресурсов, прежде всего возобновляемых источников энергии.

Необходимо также осуществлять экономически обоснованный импорт ТЭР из стран, не являющихся доминирующими поставщиками и проработать экономически обоснованные варианты поставки углеводородного сырья в Республику Беларусь.

Диверсификация видов энергоресурсов должна основываться на снижении объемов использования природного газа в качестве топлива за счет: вовлечения в топливно-энергетический баланс страны местных ТЭР, прежде всего возобновляемых источников энергии; использования атомной энергии, участия в работе Международного центра по обогащению урана.

Повышение эффективности конечного потребления ТЭР возможно достигнуть с помощью:

- 1) внедрения современных энергоэффективных технологий;
- 2) структурной перестройки экономики, направленной на развитие менее энергоемких отраслей, существенного расширения сферы услуг, замены продукции с большим удельным весом энергетической составляющей на менее энергоемкую;
- 3) совершенствование систем учета и контроля энергоресурсов и энергопотребления.

Снижения потерь электрической и тепловой энергии можно добиться путём замены изношенных участков трубопроводов и линий электропередач, не допускать повышение уровня износа основных средств топливно-энергетического комплекса (более 45 %).

Повышение энергетической безопасности страны будет способствовать производству конкурентоспособной продукции и повышению уровня и качества жизни населения при сохранении экологически безопасной среды.

## **Определение потерь мощности в поддерживающих конструкциях токопроводов мощных генераторов**

*Емельянов А.В.*

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Булат В.А.**

Токопровод – электротехническое устройство для передачи электро-энергии на малые расстояния. При выборе конструкций токопровода существенную роль наряду с основными затратами играют потери энергии в металлических частях поддерживающих и ограждающих конструкций. Значительную долю их составляют потери на перемагничивание стали.

Приведены два основных направления определения потерь: экспериментальные и косвенные. К экспериментальным относятся: измерение на отдельном токопроводе и измерение на действующем токопроводе. К косвенным: измерение потерь по температуре, напряженности магнитного поля.

Измерение мощности потерь в токопроводе при питании его от постороннего источника может быть выполнено по методу трех ваттметров. Источником питания токопровода является трехфазный трансформатор ТС с регулированием тока нагрузки. Измерительные приборы схемы питаются от трансформаторов тока ТТ, установленных в силовой цепи. Выполняется 2 опыта. Вначале необходимо измерить мощность потерь в токопроводе при секционированных экранах (при разомкнутых соединительных элементах экранов). Не изменяя измерительной схемы после соединения экранов фаз опыт повторить. Разница между полученными результатами с достаточной точностью даст потери в металлоконструкциях токопроводов.

Потери энергии на действующем токопроводе можно определить при помощи отделения отпаечный трансформатор собственных нужд и дополнительно установить комплект трансформаторов напряжения ТН, одинаковых с встроенными в токопровод ЗОМ-20 вблизи блочного трансформатора и подключить их к его выводам 20 кВ.

В случае, если известно распределение температуры вдоль поддерживающих и опорных металлоконструкций токопровода, то имеется возможность приближенно рассчитать распределение мощности потерь вдоль этих элементов, а по ним и суммарные потери мощности в конструкции токопровода.

Потери в окружающих металлоконструкциях, в свою очередь, зависят от величины результирующей напряженности магнитного поля токопроводов.



### **Литература**

1 Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций : учеб. пособие для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

2 Борчанов, Г.С. Индукционный нагрев стальных конструкций в магнитном поле однофазного токопровода / Г.С. Борчанов. // Известия вузов СССР – Энергетика. – 1958. – № 4. – С. 61–66.

## Дискретные системы управления

*Жиркова К.Ю.*

Научный руководитель – к.т.н. Булойчик Е.В.

В дискретной системе управления один или несколько сигналов являются дискретными и представляют собой последовательность кратковременных импульсов. В состав дискретной системы наряду со звеньями непрерывного действия входят элементы, преобразующие непрерывные сигналы в дискретные, и элементы, выполняющие обратное преобразование. Преобразование непрерывного сигнала в дискретный называется квантованием. Различают три вида квантования сигналов: по уровню; по времени; по уровню и времени (совместно). В зависимости от применяемого вида квантования все дискретные системы разделяют на три класса: релейные, импульсные и цифровые. В релейных системах квантование осуществляется только по уровню, в импульсных – по времени, а в цифровых – и по уровню, и по времени.

Основные особенности дискретных систем управления связаны с процессами квантования информации по уровню и по времени. Для перехода от аналоговых величин к цифровым используются аналого-цифровые преобразователи (АЦП). К числу наиболее распространённых АЦП относятся преобразователи: напряжение-код, частота-код, фаза-код. В цифровой системе автоматического регулирования, которая представлена на рисунке 1, для отображения процессов квантования информации по уровню вводятся нелинейные звенья НЗ1, НЗ2.

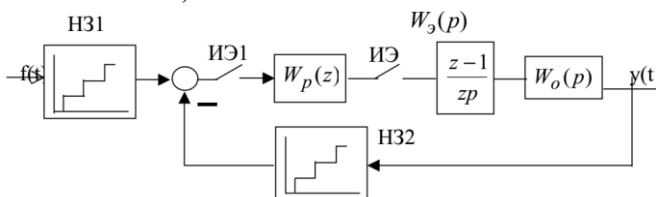


Рисунок 1 – Цифровая система автоматического регулирования

Для реализации законов управления и для обработки информации требуется некоторое время. Время приёма и выдачи информации пренебрежительно мало, по сравнению с общим временем, затрачиваемым на реализацию алгоритмов управления. Приём и выдача информации с ЭВМ отображается введением идеальных импульсных элементов ИЭ1 и ИЭ2. Согласование выходных сигналов цифрового регулятора с сигналами управления объектом осуществляется с помощью цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). Его свойства, как нелинейного звена, аналогичны

АЦП. Однако с учетом того, что разрядность ЦАП больше разрядности АЦП, эти свойства обычно не учитываются, и ЦАП представляется в виде фиксирующего звена.

Квантование по уровню осуществляется в АЦП. Типичная нелинейная характеристика в виде многоступенчатого релейного устройства изображена на рисунке 2.

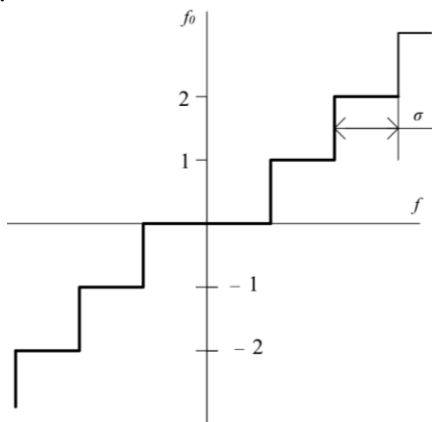


Рисунок 2 – Нелинейная характеристика многоступенчатого релейного устройства

Выходной сигнал АЦП формируется как совокупность целых чисел. На рисунке 2 параметр  $\sigma$  представляет собой шаг квантования информации по уровню. Поведение систем, в которых есть элемент, имеющий зону нечувствительности, изучается в теории релейных систем.

Квантование по времени заключается в фиксации мгновенных значений непрерывного сигнала в равноотстоящие друг от друга дискретные моменты времени. При этом квантованный по времени сигнал представляет собой, так называемую решётчатую функцию — последовательность идеальных импульсов. Смежные моменты времени отличаются друг от друга на постоянную величину, называемую интервалом дискретности (интервалом квантования по времени, периодом повторения, периодом дискретности).

## Применение Z-преобразования в системах управления

*Жиркова К.Ю.*

**Научный руководитель – к.т.н. Булойчик Е.В.**

Операционное исчисление играет важную роль при решении прикладных задач, особенно в современной автоматике. Обобщением обычного преобразования Лапласа на дискретные функции является дискретное преобразование Лапласа (Z-преобразование), которое является основным математическим аппаратом при анализе линейных импульсных систем.

Z-преобразование – один из самых распространенных способов анализа дискретных цифровых последовательностей.

Это преобразование играет для дискретных сигналов и систем такую же роль, как для аналоговых сигналов – преобразование Лапласа. Большое значение Z-преобразование имеет для расчетов рекурсивных цифровых систем обработки сигналов. Таковыми являются фильтры с бесконечной импульсной характеристикой – БИХ-фильтры.

Анализ устойчивости систем выполняется для рекурсивных систем с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-систем). Такие системы описываются либо непосредственно в виде разностного уравнения, либо передаточной функцией в виде Z-образа импульсной характеристики или разностного уравнения.

В устойчивой системе все полюсы передаточной функции должны находиться за границами единичной окружности. Система с полюсом на единичной окружности также считается неустойчивой (потенциально неустойчивой), даже если во входном сигнале нет гармоник с частотой, соответствующей положению данного полюса на окружности. Это определяется тем, что коэффициент усиления системы в точке полюса равен бесконечности и любой бесконечно малый сигнал на этой частоте даст бесконечно большой сигнал на выходе. Естественно, что для практических систем понятия бесконечности не существует и можно пытаться принять определённые меры для исключения таких критических частот. Так, например, в интегрирующих системах полюс находится на нулевой частоте, и из входного сигнала можно исключить постоянную составляющую, но при этом изменяется и характер интегрирования (интегрируются только динамические составляющие входного сигнала). Следует также учитывать, что во входных сигналах обычно всегда присутствует определённый статистический шум, наблюдаются скачки, присутствует шум квантования и эффекты с непрерывным частотным спектром, которые могут приводить к огромным ошибкам при обработке данных в потенциально неустойчивых

системах. Практически осуществимый способ повышения устойчивости систем – компенсировать полюсы на окружности нулями в этих же точках, но это может приводить к существенному изменению частотной характеристики системы.

Оценку устойчивости рекурсивной системы можно проводить и по виду её импульсной характеристики (вычислением обратного  $Z$ -преобразования или подачей импульса Кронекера на вход (алгоритм) системы). Если значения коэффициентов увеличиваются по мере роста номеров – система неустойчива. Если они очень медленно уменьшаются (медленно стремятся к нулю) – система устойчива минимально, имеет большое время установления рабочего режима, при определённых условиях может давать большие погрешности в обрабатываемых данных.

## **Решение вопроса регулирования уровней токов короткого замыкания**

*Зарихта К.С., Позняк Д.О., Русецкий К.И.*

**Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.**

Принимаемое решение по ограничению токов короткого замыкания (КЗ) должно иметь соответствующее технико-экономическое обоснование, включая анализ возможных режимов и показателей надежности работы электроустановки, условий оперативных переключений в схеме при аварийных ситуациях, а также условий последующего расширения электроустановки и реконструкции распределительных устройств.

Для обоснованного решения вопроса о регулировании уровней токов КЗ и параметров оборудования на различных этапах необходима информация о динамике изменения во времени интегральных параметров энергосистем и параметров электрооборудования. Эта информация должна включать в себя как минимум следующие данные:

- уровни токов однофазного и трехфазного КЗ;
- кривые распределения уровней токов КЗ по узлам сетей различного напряжения;
- число и параметры установленных в сетях выключателей, трансформаторов и автотрансформаторов (блочных и связи), генераторов, реакторов и токоограничивающих устройств;
- число точек стационарного и автоматического деления сети;
- необходимое количество выключателей различных параметров на перспективу при запланированной структуре и параметрах сетей;
- общую длину линий электропередачи различного напряжения;
- площадь электроснабжения энергосистемы, плотность нагрузки;
- плотность сети;
- плотность генерирующих мощностей;
- уровни и кривую распределения наибольших скоростей восстанавливающегося напряжения для основных узлов энергосистемы;
- технико-экономические параметры электрооборудования, включая зависимость стоимости выключателей различного типа от номинального тока отключения и нормированной скорости собственного восстанавливающегося напряжения;
- коэффициенты распределения выдаваемой мощности электростанций непосредственно в сети различного напряжения.

Степень полноты исходной информации, ее достоверность, объективный анализ и учет в значительной степени определяют качество принимаемых решений по регулированию уровней токов КЗ в энергосистемах.

## **Моделирование переходного процесса при коротком замыкании в среде Simulink MatLab**

*Изоитко О.Л.*

**Научный руководитель – Артеменко К.И.**

Переходные процессы возникают при любых изменениях режима электрической цепи: при подключении и отключении цепи, при изменении нагрузки, при возникновении аварийных режимов (короткое замыкание, обрыв провода). Изменения в электрической цепи можно представить в виде тех или иных переключений, называемых в общем случае коммутацией. Физически переходные процессы представляют собой процессы перехода от энергетического состояния, соответствующего до коммутационному режиму, к энергетическому состоянию, соответствующему после коммутационному режиму. Исследования переходных процессов реализуются методами математического моделирования. Одной из программ является MatLab со своим приложением Simulink. Simulink выполняет симуляции работы моделируемых систем и устройств.

Целью работы является изучение возникновения переходных процессов, их видов, особенностей и способов ограничения.

Задача исследования – определение уровней токов в переходном процессе.

При анализе переходных процессов в электрических цепях считается, что:

- рубильники включаются и размыкаются мгновенно;
- время переходного процесса, теоретически бесконечно длительное;
- установившийся режим после коммутации рассчитывают при условии  $t \rightarrow \infty$ .

Переходные процессы обычно быстро протекающие: длительность их составляет десятые, сотые, а иногда и миллиардные доли секунды. Сравнительно редко длительность переходных процессов достигает секунд и десятков секунд. Тем не менее, изучение переходных процессов весьма важно, так как позволяет установить, как деформируется по форме и амплитуде сигнал, выявить превышения напряжения на отдельных участках цепи, которые могут оказаться опасными для изоляции установки, увеличения амплитуд токов, которые могут в десятки раз превышать амплитуду тока установившегося периодического процесса, а также определять продолжительность переходного процесса. С другой стороны, работа многих электротехнических устройств, особенно устройств промышленной электроники, основана на переходных процессах.

При проведении исследования простейшей электрической схемы уровни токов в момент короткого замыкания превысили номинальные токи и составили:

- для фазы *A* – 800 А;
- для фазы *B* – 1000 А;
- для фазы *C* – 800 А.

#### **Литература**

1 Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М. : ДМК Пресс; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

2 Халилов, Ф.Х. Переходные процессы в энергетических системах / Ф.Х. Халилов. – СПб. : НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2013. – 80 с.

3 Стариков, С.В. Исследование в оболочке MatLab переходных процессов / С.В. Стариков, В.А. Чевычелов, В.И. Гуль // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Сер. 4, Энергетика. Электроэнергетика. – 2009. – № 11. – С. 47–50.



## Подводные кабельные линии

*Исмоилов Н.А.*

**Научный руководитель – Климкович П.И.**

Подводный силовой кабель – кабель, служащий для передачи данных и предназначенный для прокладки под водой по дну водоема. Материалы кабеля должны быть подобраны так, чтобы при механических изменениях (растяжении кабеля в ходе эксплуатации/укладки, например) не изменялись его рабочие характеристики. Несомненный интерес представляет непосредственное устройство кабеля, который будет работать на глубине в 5–8 километров включительно. В настоящее время кабели с пропитанной бумажной изоляцией и маслонаполненные кабели постепенно уступают свое место кабелям нового поколения с пластмассовой изоляцией (КПИ). Поэтому подводные кабельные линии проектируются, как правило, на основе КПИ 35–110 кВ. При этом в качестве альтернативных конструкций для подводного исполнения могут рассматриваться кабели как однофазного исполнения (ОИ), так и трехфазного исполнения (ТИ). Из-за больших механических нагрузок в водной среде КПИ однофазного и трехфазного исполнений для подводной прокладки выполняются в броне. Силовые подводные кабели постоянного тока с масляно-бумажной изоляцией прокладывались и успешно эксплуатируются вплоть до настоящего времени. ТПЖ кабеля медная уплотненная, сечение 1100 мм<sup>2</sup>. Ток в линии до – 1050 А. Пространство между скрученными проволоками заполнено компаундом, блокирующим продольное распространение воды. Экраны по ТПЖ и изоляции изготовлены из полупроводящей сшиваемой композиции. Поверх этой оболочки методом экструзии наложено полиэтиленовое покрытие. Броня состоит из одного слоя оцинкованной проволоки. Наружное покрытие брони – из полипропиленовой пряжи, которая имеет пониженный коэффициент трения и облегчает прокладку. Между наружным полупроводящим слоем и металлическим экраном наложена полупроводящая водонабухающая лента, также предотвращающая распространение влаги вдоль кабеля. Металлическая оболочка – из свинцового сплава. Основные типы таких кабелей – кабели с бумажной пропитанной изоляцией и маслонаполненные. В ограниченном количестве в подводных кабельных линиях в свое время использовались также газонаполненные кабели с изоляцией из предварительно пропитанных бумажных лент. Силовые подводные кабели постоянного тока используются для передачи электроэнергии на острова или в недоступные районы на материке, а также из стран, в которых имеется избыток электроэнергии, в страны, в которых электроэнергии недостает, если эти страны разделены водным пространством. Так, в 2010 г.

была завершена в полном объеме прокладка подводной кабельной линии на напряжение 500 кВ между о. Сардиния и материковой Италией. Длина подводной части кабельной линии составляет 425 км, глубина прокладки достигает 1620 м. Прокладка оптоволоконного кабеля по морско-океаническому дну проходит непрерывно из точки А в точку Б. Кабель укладывается в бухты на корабли и транспортируется к месту спуска на дно. Команда укладчиков при помощи специальных машин разматывает кабель с определенной скоростью и, сохраняя необходимое натяжение кабеля за счет движения корабля продвигается по заранее проложенному маршруту. При каких-либо проблемах, обрывах, или повреждениях на кабеле предусмотрены специальные якоря.

#### **Литература**

1 Протасов, В.Р. Введение в электроэкологию / В.Р. Протасов. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 335 с.

2 Кадомская, К.П. Электромагнитная совместимость с окружающей средой кабельных линий среднего и высокого напряжения с пластмассовой изоляцией / К.П. Кадомская. – М. : Энергоатомиздат, 2003. – 56–62 с.

3 Ларина, Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии / Э.Т. Ларина. – М. : Энергоатомиздат, 1996. – 343 с.

## **Пути проникновения помех в микропроцессорные устройства**

*Калитуха А.А.*

**Научный руководитель – Гурьянчик О.А.**

Существенным при рассмотрении технико-экономических проблем электромагнитной совместимости является значение механизмов связи между источником помех и чувствительным к помехам элементом, обусловленных механизмами воздействий и соответствующих основных правил, по которым можно эффективно противостоять этим воздействиям уже на стадии проектирования, создания устройств.

Гальваническое влияние может осуществляться через общие полные сопротивления, как правило, через сопротивления сетевых проводов, систем опорных потенциалов или через систему защитных и заземляющих проводов.

Для снижения гальванического влияния в соединительных проводах цепей питания и сигнальных контурах рекомендуются следующие мероприятия:

- выполнение соединений между двумя или более контурами с наиболее низким полным сопротивлением, особенно низкой индуктивностью;
- гальваническая развязка, то есть устранение совместных проводящих соединений между различными контурами, или гальваническое разделение контуров таким образом, чтобы ток наиболее мощного контура не протекал по слаботочному контуру;
- разделение потенциалов;
- выбор скорости изменения тока не большей, чем требуется по условиям функционирования.

Причиной емкостного влияния могут быть паразитные, то есть неустранимые схемным путем, емкости между проводами или проводящими предметами, принадлежащими разным токовым контурам.

Практический интерес представляют следующие случаи:

- влияющий и испытываемый контуры гальванически разделены;
- оба контура имеют общий провод системы опорного потенциала;
- провода токового контура имеют большую емкость относительно земли.

Индуктивное влияние обусловлено паразитным потокоцеплением между контурами промышленных устройств и образованными при ударах молнии или разрядах статического электричества.

Мероприятия по снижению индуктированных напряжений следующие:

- снижение до возможных пределов взаимной индуктивности;
- уменьшение скорости изменения во времени потока при помощи короткозамкнутой петли;
- осуществление связи контуров ортогонально направлению силовым линиям магнитного поля;
- компенсация индуктированного в контуре напряжения путем скрутки проводов;
- снижение действия созданного магнитного потока путем скручивания соединительных проводов контура;
- экранирование кабелей, соединительных проводов, модулей и приборов ферромагнитными экранами.

Причиной воздействия излучения являются электромагнитные волны, излучаемые токовым контуром и распространяющиеся в окружающем пространстве со скоростью света  $c = 300000$  км/с.

К проблеме помехозащищенности микропроцессорных систем следует относиться с максимальным вниманием, поскольку неправильный выбор схемы подключения, разводки кабелей, системы заземления и экранирования могут свести на нет достоинства дорогой и, казалось бы, крайне надежной электронной части системы.

## **Вращающиеся трансформаторы и их применение**

*Китаев А.С.*

**Научный руководитель – Тетерина Л.В.**

Принцип работы вращающихся трансформаторов основан на взаимной индуктивности между обмотками статора и ротора, которая изменяется в определенной функциональной зависимости от угла поворота ротора. При подключении обмотки возбуждения к сети переменного тока в машине возникает продольный магнитный поток, пульсирующий во времени с частотой сети.

Обмотка статора с потоком не связана, а, следовательно, он не индуцирует в ней ЭДС. Эту обмотку используют для компенсации поперечных потоков, создаваемых обмотками ротора при нагрузке вращающегося трансформатора. Таким образом, в обмотках ротора при холостом ходе индуцируются ЭДС, пропорциональные синусу или косинусу угла поворота ротора относительно соответствующего потока.

Применяя различные схемы включения обмоток статора и ротора, можно получить и другие функциональные зависимости, а также уменьшить погрешности, вызываемые током нагрузки.

Для борьбы с поперечными магнитными потоками, в современном приборостроении применяют метод симметрирования, который может быть выполнен как на обмотках статора, так и ротора. Симметрирование на обмотках ротора заключается во взаимной компенсации поперечных магнитных потоков нагрузкой, в роли которой выступают два сопротивления одинаковых по значению. При симметрировании на обмотках статора происходит ослабление поперечных магнитных потоков за счет эффекта размагничивания перпендикулярно расположенной к ней обмотки статора.

### **Литература**

1 Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций : учеб. пособие для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

2 Брускин, Д.Э. Электрические машины / Д.Э. Брускин. – М. : Энергоатомиздат, 2002. – 205 с.

## Средства компьютерного моделирования

*Климкович И.П.*

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Раджух М.А.**

При выполнении компьютерного моделирования к решению поставленных задач привлекаются средства вычислительной техники.

Первая задача компьютерного моделирования – выполнение математических вычислений. В простейших случаях это расчеты по более или менее сложным формулам, или же приходится прибегать к решению алгебраических, дифференциальных, интегральных уравнений.

Вторая задача компьютерного моделирования – удобное отображение результатов моделирования. Для решения данной задачи необходим компьютер под управлением современной операционной системы, снабженный современным прикладным и специализированным программным обеспечением.

Наряду с получением результатов моделирования в виде некоторых числовых данных, необходимо отобразить эти результаты вычислительного эксперимента в виде графиков. При представлении результатов целесообразно также использовать презентации и анимационные клипы.

Наиболее трудоемким в компьютерном моделировании является формулировка и вычислительная реализация математической модели. Именно объемом вычислений и качеством представления полученных результатов определяются требования к инструментарию для проведения моделирования. Наиболее универсальными средствами могут выступать системы программирования на языках высокого уровня, например, Borland C++ Builder, Borland Delphi, Microsoft Visual Studio. Здесь весьма эффективно могут быть реализованы сколь угодно сложные вычислительные алгоритмы. Наличие визуальных компонентов программирования дает возможность и наглядного графического представления моделей. Однако, все необходимо разрабатывать «вручную», начиная от программирования тех или иных вычислительных схем и заканчивая созданием анимации. Очевидно, что требуется достаточно высокая подготовленность разработчика. Применение специализированных библиотек только в небольшой степени упрощает задачи. Сами же библиотеки также необходимо детально изучать и учиться с ними работать.

Частично освободить разработчика от сугубо вычислительных задач удастся с использованием программных пакетов с языками сверхвысокого уровня: Mathematica, MatLab, MathCAD и других подобных. Однако изучение этих пакетов требует больших трудозатрат и довольно большого времени. Кроме того, «сокрытие» от разработчика деталей вычислитель-

ных схем, как это имеет место в языках сверхвысокого уровня, далеко не всегда целесообразно.

Таким образом, имеется потребность использования при моделировании каких-то специализированных средств, которые были бы ориентированы именно на реализацию компьютерного моделирования исследуемых объектов.

На данный момент такие пакеты существуют и их примерами выступают: Model Vision Studio (MVS), Stratum 2000, система MODELLUS.

Обеспечивающим наибольшие возможности является система MVS. В то же время методика работы с этим инструментом достаточно сложна и требует специального обучения. Stratum 2000 более прост в использовании, но и несколько уступает по своим возможностям MVS. Оптимальным для широкого использования в начальном обучении компьютерному моделированию считается программа MODELLUS.

Главными достоинствами пакета MODELLUS являются простота использования и отлично организованная система графического и анимационного отображения моделей. Транслятор языка MODELLUS является интерпретатором, так что какие-либо исполняемые файлы здесь не создаются, и модели выполняются именно в среде пакета. Тем не менее, поскольку результаты представляются обычными графическими окнами, они могут быть легко интегрированы в другие windows-приложения. В настоящее время существуют как коммерческие, так и свободно распространяемые версии программы.

## **Компьютерное моделирование как метод исследований реальных объектов**

*Кожемяко А.Г., Башаркевич Я.В., Кривонос Ю.И., Климкович И.П.*

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Раджух М.А.**

Началом компьютерного моделирования является определение объекта с последующим построением его модели. Моделирование включает в себя отображение проблемы из реального мира в процесс абстракции, анализ и оптимизацию модели, нахождение решения и отображение решения обратно в реальный мир. Создавая модель объекта, исследователь познает объект и строит его формальное описание.

Компьютерное моделирование как метод исследований основывается:

- на построении математических моделей для описания изучаемых процессов;
- на использовании вычислительной техники, обладающей высоким быстродействием и способной вести диалог с пользователем.

Реальная польза от моделирования может быть получена при выполнении следующих условий:

- модель должна быть адекватна оригиналу, т. е. с достаточной точностью отображать интересующие исследователя характеристики оригинала;
- модель должна устранять проблемы, связанные с физическими измерениями каких-то сигналов или характеристик оригинала.

Выделяют следующие этапы компьютерного моделирования: постановка задачи, разработка модели; вычислительный эксперимент и анализ результатов моделирования.

На этапе постановки задачи необходимо отразить три основных момента: описание задачи, определение целей моделирования и анализ объекта или процесса.

Существуют следующие виды моделей: информационная, знаковая и компьютерная.

Выбор наиболее существенной информации при создании информационной модели и ее сложность обусловлены целью моделирования. Построение информационной модели является отправным пунктом разработки модели. Все элементарные объекты, выделенные при анализе должны быть показаны во взаимосвязи. В информационной модели отображаются только бесспорные связи и очевидные действия. Такая модель дает первичную идею, определяющую дальнейший ход моделирования. Информационная модель, как правило, представляется в той или иной знаковой форме, которая может быть компьютерной или некомпьютерной. Компьютерная модель – модель реализованная средствами программной среды.



При моделировании на компьютере, имея представление о классах программных средств, их назначении, инструментарии и приемах работы, можно легко преобразовать информационную знаковую модель в компьютерную и провести соответствующий эксперимент.

Вычислительный эксперимент включает две стадии: составление плана моделирования и технологию моделирования. План моделирования должен четко отражать последовательность работы с моделью. Первым пунктом плана является разработка теста, а вторым – тестирование модели. После тестирования, когда есть уверенность в правильности функционирования модели, можно переходить непосредственно к технологии моделирования.

Каждый выполненный эксперимент должен сопровождаться анализом результатов моделирования.

Конечной целью моделирования является принятие решения, которое должно быть выработано на основе всестороннего анализа полученных результатов. Если известен результат, то можно сравнить его с полученным результатом моделирования. Полученные выводы часто способствуют проведению дополнительной серии экспериментов, а иногда и к изменению модели.

Основой для выработки решения служат результаты тестирования и экспериментов. Если результаты не соответствуют целям моделирования, значит, допущены ошибки на предыдущих этапах.

## **Экономическая оценка возобновляемых источников энергии**

*Лапина Т.С.*

**Научный руководитель – к.э.н., доцент Нагорнов В.Н.**

Возобновляемая энергия является важной составляющей энергетики в XXI веке, а ее эффективное использование – одно из направлений устойчивого энергообеспечения различных стран мира. Экономический потенциал использования возобновляемых источников в мире в настоящее время оценивается и объеме более 200 млрд. т у.т. в год, что минимум в два раза превышает годовой объем добычи всех видов ископаемого топлива. Одним из главных экономических показателей конкурентоспособности той или иной технологии электро- и теплогенерации является себестоимость производимой энергии. В настоящее время важными категориями при сравнении конкурентоспособности являются экологичность и политический аспект. Однако в производстве энергии из возобновляемых источников энергии главной целью является grid parity, т. е. равенство себестоимости «зеленой электроэнергии» и энергии из традиционных ископаемых источников.

Средние диапазоны себестоимости электроэнергии, произведенной из возобновляемых источников энергии, указаны в таблице 1. Исходя из представленных данных можно отметить, что среди электрогенерирующих систем наиболее дешевой электроэнергией является геотермальная (от 4 центов/кВт·ч). Одновременно геотермальная энергетика сегодня развивается заметно медленнее фотовольтаики и ветроэнергетики из-за технологических сложностей построения крупной системы. К слову, у ветроэлектростанций себестоимость уже начинается от 5 центов/кВт·ч, в то время как для фотовольтаики минимальный показатель – 15 центов/кВт·ч. Необходимо учитывать, что приведенная себестоимость указана без учета субсидий и прочих механизмов государственной поддержки.

Экономика возобновляемых источников энергии характеризуется короткими сроками проектирования и строительства, снижающимися переменными и капитальными затратами и стоимостью киловатт-часа. Кроме того, использование возобновляемых источников энергии в значительной мере снимает риски долгосрочных договоров на поставку электроэнергии – себестоимость электроэнергии солнечных и ветровых электростанций не зависит от скачков на топливном рынке. Стоит отметить и то, что значительное снижение цен на ископаемое сырье не тормозит развитие возобновляемой энергетики. Промышленные предприятия, выбрав в качестве альтернативного варианта энергообеспечения производственного процесса

совмещенную систему энергообеспечения, при которой часть энергии покупается у гарантированного поставщика, а часть вырабатывается на собственном источнике в количествах, обусловленных наличием вторичных энергоресурсов, получают возможность совмещать количество закупаемой энергии и энергии собственного производства, что гарантирует некоторую свободу от монополии большой энергетики.

Таблица 1 – Себестоимость электроэнергии из возобновляемых источников энергии

Технология	Типичные характеристики	Себестоимость электроэнергии (центов/кВт·ч)
Большие/малые гидроэлектростанции	10–18000 МВт / 1–10 МВт	3–5 / 6–12
Наземные/шельфовые ветроэлектростанции	1 турбина: 1,5–3,5 МВт / 1,5–5 МВт	5–9 / 10–14
Электрогенерация на биомассе	1–20 МВт	5–12
Геотермальная энергетика	1–100 МВт	4–7
Фотовольтаический модуль для установки на крыше	Пиковая мощность: 2–5 кВт	20–50
Промышленная фотовольтаическая станция	Пиковая мощность: 200 кВт – 100 кВт	15–30

Себестоимость энергии из возобновляемых источников энергии с каждым годом сокращается. Однако даже на сегодняшний день наилучшие показатели среди возобновляемой энергии уступают ископаемым источникам. Конечно, сравнивать цены и тарифы необходимо для конкретной страны, а иногда и для конкретного региона. Так, при решении производственных задач должны учитываться характеристики энергохозяйства страны, а также технологические особенности использования различных видов энергетических ресурсов.

#### Литература

1 Анализ себестоимости энергии из возобновляемых источников [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.cleandex.ru>.

2 Русан, В.И. Возобновляемая энергетика: мировой опыт и проблемы развития ВИЭ в Беларуси / В.И. Русан, И.Л. Мордань // Энергетика и ТЭК. – 2016. – № 5. – С. 21–26.

## **Высоковольтные генераторные элегазовые комплексы**

*Лашук М.С.*

**Научный руководитель – Тетерина Л.В.**

Особенности генераторных элегазовых выключателей:

- большое число ступеней значений номинальных токов и напряжений;
- высокое содержание аperiodической составляющей в токе короткого замыкания (КЗ) от генератора;
- большие значения параметров восстанавливающего напряжения (ПВН) на контактах выключателя, и в первую очередь при отключении КЗ от системы;
- коммутация в режиме рассогласования фаз;
- высокий механический ресурс, особенно для гидростанций и станций, работающих в пиковом режиме, например ГАЭС;
- высокий коммутационный ресурс по нагрузочным токам для гидростанций и ГАЭС.

Генераторный выключатель необходим для:

- повышения надежности электроснабжения собственных нужд (СН) энергоблока;
- отключения коротких замыканий, если они возникают на генераторном напряжении;
- снижения объема повреждения и предотвращения развития аварии в случае возникновения короткого замыкания в обмотке низшего напряжения трансформатора блока;
- повышения гибкости в управлении энергоблоком.

Отдельные выключатели или комплексы?

Необходимо применять генераторные выключатели, а не генераторные комплексы. Следует учесть, что при реконструкции с применением комплексов потребовалось бы выполнение большого объема СМР. Кроме того, в типовой комплектации комплексов мощность вторичных обмоток трансформаторов тока не превышает 30 ВА. Она выбирается исходя из предположения, что на электростанции применяемые устройства релейных защит и автоматики, автоматический регулятор напряжения и др. выполняются на микропроцессорной технике. Но реконструкция, как правило, производится поэтапно, поэтому порой замена вышеназванных устройств во времени происходит позже. В этом случае вторичная мощность трансформаторов тока и напряжения должна быть увеличена. Как следствие, возрастает и их цена. Что касается установки в составе комплекса разъединителя и защитных аппаратов от перенапряжений – это вопрос, который должен решаться отдельно в каждом конкретном случае.

Строительство подстанции 110/20/10 кВ «Кроноспан» г. Сморгонь.

Основное оборудование подстанции: элегазовый выключатель 110 кВ, распределительные устройства 10 и 20 кВ, трансформаторы (силовой, тока и напряжения, собственных нужд, заземляющих резисторов), релейная защита и автоматика и др. производства концерна Siemens AG. Его официальным поставщиком оборудования в Беларуси является SIMATEK, благодаря чему поставки выполнены в кратчайшие сроки и по самым лучшим ценам.

На ПС «Кроноспан» внедрена система телемеханики, спроектированная специалистами SIMATEK. Система обеспечивает централизованное и локальное управление электротехническим оборудованием в реальном масштабе времени. На верхнем уровне используется SCADA (диспетчерское управление и сбор данных) на базе программного пакета WinCC, на нижнем – контроллер Simatic S7-300.

#### **Литература**

1 Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций : учеб. пособие для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

2 Кузин, П.В. Наладка элегазового оборудования : учеб. пособие для вузов / П.В. Кузин. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 112 с.

## Дуговая защита

*Лобачев В.В.*

**Научный руководитель – Гурьянчик О.А.**

Дуговая защита – это чрезвычайно быстродействующая система защиты для комплектных распределительных устройств низкого и среднего напряжения. Система специально разработана, чтобы увеличить безопасность персонала и минимизировать материальные затраты вызванные воздействием электрической дуги на электрооборудование. Небольшой характер повреждений также означает ограниченную потребность в ремонтных работах и позволяет быстро восстановить электроснабжение по стандартной схеме.

Устройство дуговой защиты может работать по трем различным схемам, как независимое устройство дуговой защиты, как часть устройства защиты или как интегрированный модуль между главным модулем системы и устройством защиты.

Когда используется традиционная временная селективность и блокировки, основанные на принципе логической селективности, обычные системы защиты не могут обеспечить быстрое обнаружение и реакцию на возникшее повреждение. Дополнительно, высокое полное сопротивление замыкания на землю может вызвать длительное время срабатывания устройства защиты от замыканий на землю, что увеличивает негативные последствия воздействия электрической дуги. Эти факторы приводят к значительному риску для людей и повреждению оборудования. Тип дуговой защиты может быть различным в зависимости от функций, выбранных заказчиком.

Существуют пять основных видов дуговых защит:

- фототиристорного типа;
- оптоволоконного типа;
- защита с мембранным выключателем;
- дуговая защита шин.

### Литература

1 Нагай, В.И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей / В.И. Нагай. – М. : Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.

2 Маруда, И.Ф. Релейная защита электрических объектов и энергетических систем / И.Ф. Маруда. – М. : Энергопрогресс, 2015. – 275 с.

## Повышение электродинамической стойкости гибких проводников

*Ложечников И.И.*

Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

Типовыми решениями в открытых распределительных устройствах (ОРУ) напряжением 35 кВ и выше в качестве токоведущих частей рекомендуются гибкие проводники тех же марок и сечений, что и для воздушных линий электропередачи ЛЭП. При указанных напряжениях в ОРУ с жесткой ошиновкой требуется большое количество опорных изоляторов. Опорные изоляторы и жесткие шины сравнительно дороги. Жесткие шины чувствительны к сейсмическим воздействиям, а также к просадкам и наклонам опорных конструкций, требуют точной установки изоляционных опор и высокого качества строительно-монтажных работ.

Компьютерный расчет параметров электродинамической стойкости гибких шин РУ производится с помощью, разработанной на кафедре «Электрические станции» БНТУ КП FLEBUS. В программе FLEBUS применяется расчетная модель провода в виде гибкой упругой нити. Представление провода расчетной моделью с распределенной массой позволяет более точно выполнить расчет электродинамического взаимодействия и вычислить характеристики любой его точки. Пространственное движение провода в виде гибкой упругой нити при КЗ описывается нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных с переменными коэффициентами.

Токи электродинамической стойкости гибкой ошиновки  $I_{дин}$  возрастают с увеличением сечения проводника. Это объясняется большей инерционностью тяжелых проводников. Однако это увеличение не столь значительно, поэтому выбор проводника большего сечения во вновь сооружаемых РУ приведет к росту затрат и не даст желаемого эффекта в долгосрочном периоде с учетом вероятного роста токов КЗ. В существующих РУ такое решение вообще неприемлемо из экономических и технических соображений. Одним из мероприятий, ограничивающих размах колебаний, может стать уменьшение стрелы провеса. Однако это приводит к дополнительным нагрузкам на опорные и изоляционные конструкции.

Наиболее действенным решением, не требующим больших материальных и временных затрат, является установка междуфазных распорок. Их можно применять как во вновь сооружаемых, так и в существующих РУ.

### Литература

1 Сергей, И.И. Упрощенный расчет максимальных тяжений проводов на двух стадиях их движения при коротком замыкании / И.И. Сергей, А.П. Андрукевич,

Е.Г. Пономаренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 6. – С. 12–26.

2 Сергей, И.И. Численный анализ токов электродинамической стойкости гибких проводов электроустановок и способов их повышения / И.И. Сергей, Е.Г. Пономаренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 5. – С. 10–17.



## **Перспективы развития возобновляемых источников энергии в Республике Казахстан**

**Мажитова Х.**

**Научный руководитель – к.э.н., доцент Манцера Т.Ф.**

Сегодня, когда весь мир уделяет значительное внимание возобновляемым и альтернативным источникам энергии, Казахстан обладает существенным потенциалом по этим видам энергии ввиду своего уникального географического положения, широкими возможностями использования ветровой и солнечной энергии, большим энергетическим запасам нефтяных и газовых ресурсов.

Привлекательность возобновляемой энергетики обусловлена некоторыми обстоятельствами:

- она доступна в каждой точке нашей планеты, привлекательна для всех стран, отвечая их интересам в плане энергетической независимости;
- это экологически чистый источник энергии, позволяющий использовать его во всевозрастающих масштабах без негативного влияния на окружающую среду;
- это практически неисчерпаемый источник энергии, который будет доступен и через миллионы лет.

По сути, ключевым фактором использования ВИЭ в Казахстане, также как и во всем мире, является необходимость снижения негативного воздействия энергетики на окружающую среду.

При этом именно доля энергетики составляет 87 % от общих национальных эмиссий выбросов парниковых газов или 214,4 млн. т углекислого газа. Напомним, что в настоящее время в Казахстане до 85 % от общей выработки электроэнергии производится путем сжигания органического топлива, в основном, местных углей, в меньшей степени – углеводородного сырья. Около 10 % выбросов в атмосферу страны от стационарных источников и образование значительной доли токсичных отходов приходится и на предприятия, занятые в сфере добычи сырой нефти и попутного газа.

Использование ВИЭ для выработки и поставки электроэнергии в существующие сетевые энергосистемы может быть экономически оправданным в энергодефицитных районах Казахстана. При этом именно возобновляемая энергетика может стать ключевым фактором развития отдаленных регионов страны.

Потенциал нетрадиционных возобновляемых источников энергии в Казахстане весьма значителен, но пока используется недостаточно. Разработ-

ка возобновляемых энергетических ресурсов была бы особенно эффективна для выработки электроэнергии на местном уровне, а также для небольших рассредоточенных нагрузок.

Казахстан располагает прекрасными возможностями для использования ветровой энергии, особенно, в районах Джунгарских ворот и Чиликского коридора, где средние годовые скорости ветра составляют 7–9 м/с и 5–9 м/с, соответственно. Близость существующих линий электропередачи, хорошая корреляция сезона ветров с растущей потребностью в электроэнергии обеспечивают условия для эффективного использования этих ресурсов. Ветровой атлас – это один из главных результатов масштабного совместного проекта Правительства Республики Казахстан и Программы развития Организации Объединенных Наций (ПРООН) по ветроэнергетике.

Казахстан характеризуется значительными ресурсами солнечной энергии. Продолжительность солнечного сияния составляет 2200–3000 часов в год, а энергия солнечного излучения 1300–1800 кВт/м<sup>2</sup> в год. Это позволяет использовать солнечные нагреватели воды и солнечные батареи, в частности портативные фотоэлектрические системы, в сельской местности на животноводческих отгонах.

Предлагаемая Казахстаном на EXPO-2017 – «Энергия будущего», затрагивает одну из насущных и важных тем современности, волнующую все мировое сообщество устойчивое использование энергии. Достижение устойчивого развития, представляющего собой здоровый баланс между развитием и окружающей средой, на данный момент является важной целью для всех стран мира.

Астана станет площадкой для демонстрации лучших мировых разработок и трендов этой отрасли, соберет звезды мировой науки и бизнеса. Казахстану, который стремится стать инновационным государством, выставка может дать мощный импульс диверсификации нашей экономики, модернизации производственных мощностей и научной базы, привлечения в страну инвестиций.

EXPO-2017 откроет новые горизонты в развитии отечественной экономики в сфере возобновляемой энергетики и новейших технологий.

## **Преобразование солнечной энергии в электрическую энергию переменного тока**

*Макеев А.А.*

**Научный руководитель – Михальцевич Г.А.**

Солнечная батарея представляет собой систему фотоэлектрических преобразователей, которые соединены друг с другом в заданной последовательности.

В структуру фотопреобразователей входит два слоя, отличающихся между собой типом проводимости:  $n$  и  $p$ . Основой для изготовления фотопреобразователей служит кремний. В слое  $n$ -типа к кремнию добавлен фосфор; в результате их взаимодействия образуется избыток отрицательно заряженных электронов. В слое  $p$ -типа к кремнию добавлен бор, в результате чего образуются так называемые «дырки», которые вызваны дефицитом в слое отрицательных зарядов. Оба слоя размещаются между разными электродами. На отрицательно заряженную панель падает солнечный свет. Он вызывает активное образование дополнительных отрицательных зарядов и «дырок». Под воздействием электрического поля, которое присутствует в  $p$ - $n$ -переходе, происходит разделение положительно и отрицательно заряженных частиц. Первые направляются в верхний слой, а вторые в нижний. Таким образом, появляется разность потенциалов, иными словами, постоянное напряжение ( $U$ ). Исходя из этого видно, что один фотопреобразователь работает по принципу батарейки. И в случае, когда к нему подсоединяется нагрузка, в цепи возникает ток. Сила тока будет зависеть от таких параметров, как:

- уровень инсоляции;
- размер фотопреобразователя;
- тип фотоэлемента;
- общего сопротивления приборов, подключенных к солнечной батарее.

Аккумулятор необходим для сохранения и накапливания энергии. Контроллер заряда ограничивает ток заряда, напряжения заряда и разряда аккумулятора. Инвертор – преобразует получаемый от солнечной батареи постоянный электрический ток в переменный ток. Стабилизатор напряжения – используется для создания заданного напряжения.

Для питания бытовой техники в большинстве случаев используется переменный ток. В зависимости от выходного сигнала различают следующие виды инверторов:

- инверторы с чистым синусоидальным выходным сигналом;
- инверторы, с модифицированным выходным сигналом;

В зависимости от типа использования можно выделить три основных вида инверторов:

– автономные инверторы, преобразователи имеет мощность от 100 до 8000 Вт. Для определения размеров подходящего инвертора, который нужен в частном случае, нужно рассчитать общую нагрузку приборов в сети электропитания. Делается это таким образом: проверяем максимальную мощность каждого устройства за единицу времени работы и складываем их вместе.

– синхронные инверторы, позволяют передать излишки неиспользуемой энергии в основную электросеть. Если используются приборы, суммарная мощность которых превышает возможности солнечной установки, то недостающую электроэнергию устройство может взять из основной электросети. При использовании синхронных инверторов в доме никогда не будет внезапного отключения электроэнергии, т. к. выручит заряженный аккумулятор. В пасмурные дни, когда эффективность работы солнечных батарей достаточно низкая, приборы будут подпитываться от обычной электросети.

– гибридные инверторы – это более дорогостоящее оборудование, обладающее преимуществами первых двух типов преобразователей. Выбор гибридных инверторов является наилучшим для создания солнечной электросети в доме.

Мощность подбираемого преобразователя зависит от максимальной мощности нагрузки и номинальной мощности солнечных батарей.

Схема соединения блоков преобразователя изображена на рисунке 1.

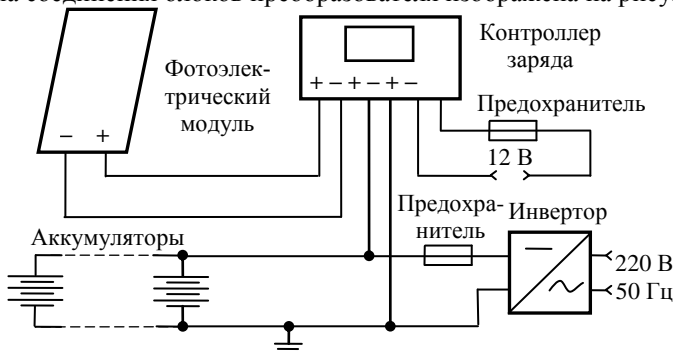


Рисунок 1 – Схема соединения блоков преобразователя

Солнечные батареи – это экологически чистый, удобный и безопасный метод получения электроэнергии. С каждым годом стоимость оборудования падает, что вызывает хороший спрос на эту продукцию.

## **Методы расчета электродинамической стойкости гибких токоведущих конструкций**

*Максимова М.С.*

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.**

На воздушных ЛЭП в качестве проводников используют многопроволочные сталеалюминиевые провода со стальным сердечником. Из-за их гибкой конструкции в результате электродинамического действия токов короткого замыкания происходят взаимные сближения и даже схлестывания фазных проводов друг с другом или с заземленными конструкциями ЛЭП. Для обеспечения электродинамической стойкости необходимо на стадии проектирования ЛЭП выполнить оценку ожидаемых максимальных отклонений и тяжений проводов при КЗ.

Оценка электродинамической стойкости гибких проводников электроустановок производится по двум условиям: недопустимого сближения фазных проводников по критерию электрической прочности воздушного промежутка и недопустимых максимальных тяжений проводов при КЗ. Для нахождения параметров электродинамической стойкости необходимо решить задачу динамики гибких проводов под воздействием электродинамических усилий от токов КЗ.

В БНТУ разработаны и используются два метода расчета электродинамической стойкости проводов электроустановок.

Дифференциальный принцип позволяет получить точную оценку смещений и тяжений проводов в функции пространства и времени. Плодотворность указанного подхода подтверждаются близким совпадением результатов компьютерных расчетов с опытными данными и расчетами других авторов.

Упрощенный метод пригоден для приближенной оценки максимальных смещений тяжений проводов для частных случаев их расположения. Оба метода взаимно дополняют друг друга. С помощью точного метода находят поправочные коэффициенты, критерии подобия решений, использования которых в упрощенных методах повышает их достоверность.

### **Литература**

1 Сергей, И.И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях / И.И. Сергей, М.И. Стрелюк. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.

2 Кудрявцев, Е.П. Инженерный расчет прочности и смещения гибких шин при коротких замыканиях / Е.П. Кудрявцев // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1984. – № 11. – С. 20–25.

## Электродинамическая стойкость гибких шин распределительных устройств электростанций

*Манцевич А.В.*

Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

Типовыми решениями в открытых распределительных устройствах (ОРУ) напряжением 35 кВ и выше в качестве токоведущих частей рекомендуются гибкие проводники тех же марок и сечений, что и для воздушных линий электропередачи ЛЭП. При указанных напряжениях в ОРУ с жесткой ошиновкой требуется большое количество опорных изоляторов. Опорные изоляторы и жесткие шины сравнительно дороги. Жесткие шины чувствительны к сейсмическим воздействиям, а также к просадкам и наклонам опорных конструкций, требуют точной установки изоляционных опор и высокого качества строительно-монтажных работ.

Компьютерный расчет параметров электродинамической стойкости гибких шин РУ производится с помощью, разработанной на кафедре «Электрические станции» БНТУ КП FLEBUS. В программе FLEBUS применяется расчетная модель провода в виде гибкой упругой нити. Представление провода расчетной моделью с распределенной массой позволяет более точно выполнить расчет электродинамического взаимодействия и вычислить характеристики любой его точки. Пространственное движение провода в виде гибкой упругой нити при КЗ описывается нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных с переменными коэффициентами.

Токи электродинамической стойкости гибкой ошиновки  $I_{дин}$  возрастают с увеличением сечения проводника. Это объясняется большей инерционностью тяжелых проводников. Однако это увеличение не столь значительно, поэтому выбор проводника большего сечения во вновь сооружаемых РУ приведет к росту затрат и не даст желаемого эффекта в долгосрочном периоде с учетом вероятного роста токов КЗ. В существующих РУ такое решение вообще неприемлемо из экономических и технических соображений. Одним из мероприятий, ограничивающих размах колебаний, может стать уменьшение стрелы провеса. Однако это приводит к дополнительным нагрузкам на опорные и изоляционные конструкции.

Наиболее действенным решением, не требующим больших материальных и временных затрат, является установка междуфазных распорок. Их можно применять как во вновь сооружаемых, так и в существующих РУ.

### Литература

1 Сергей, И.И. Упрощенный расчет максимальных тяжений проводов на двух стадиях их движения при коротком замыкании / И.И. Сергей, А.П. Андрукевич,

Е.Г. Пономаренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 6. – С. 12–26.

2 Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций : учеб. пособие для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

## **Выбор способа обеспечения энергией частного дома в Республике Беларусь**

*Марков А.Н., Дудченко Г.А.*

**Научный руководитель – к.э.н., доцент Нагорнов В.Н.**

Обеспечение энергией дома осуществляется двумя способами: присоединением к общим государственным тепловым и электрическим сетям и частным производством энергии. Во втором случае необходимо наличие собственного генерирующего оборудования, как на традиционных видах топлива, так и использующего альтернативные источники энергии. Оборудование, вырабатывающее энергию, также может быть присоединено к общей сети.

Цель данного проекта – рассчитать наиболее экономически эффективный способ выработки тепла и электричества с помощью альтернативных источников энергии.

Для достижения поставленной цели первым делом был выбран проект дома, полезной площадью 160 м<sup>2</sup> и числом жильцов равным четырём.

Выбранный проект был использован для расчёта потребления тепловой энергии, последующего определения тепловой установки, а также электропотребления бытовых приборов, необходимых для комфортной повседневной жизни. Расчёт энергопотребления проводился с учётом различных часов использования каждого прибора в летний и зимний сезоны и разной тепловой потребности в каждый из месяцев года. Выбор приборов учитывает нынешние тенденции снижения потребления электроэнергии за счёт использования современных технологий. В качестве оборудования, генерирующего тепловую энергию, был выбран электрический котёл, так как предполагается отсутствие возможности подключения газовой сети.

Следующим шагом работы был поиск способов снижения электропотребления за счёт выбора оптимального варианта тепловой установки (теплового насоса) и замены некоторых электроприборов на более экономичные.

Исходя из таблицы 1 можно сделать вывод, что при использовании теплового насоса и замене некоторых электроприборов на более энергоэффективные значительно сократится уровень электропотребления, но при этом потребуются более высокие затраты на приобретение и установку.

Далее предполагался расчёт вакуумных коллекторов в качестве основного источника теплоснабжения. В результате расчётов был сделан вывод о нецелесообразности их установки совместно с тепловым насосом.

После этого было рассчитано необходимое количество солнечных панелей для полного обеспечения электроэнергией теплового насоса и быто-



вой техники. Также был рассчитан альтернативный вариант с вакуумными коллекторами и дровяной печью для выработки тепла, а фотоэлектрическими панелями - для обеспечения электроэнергией бытовой техники. Результаты расчётов приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика энергопотребления и стоимости приборов и оборудования

Показатели	Вариант 1	Вариант 2
Электропотребление приборов, кВт·ч/год	8768	6560
Теплопотребление дома, Гкал/год	29,6	
Электропотребление теплового оборудования, кВт·ч/год	50200	13640
Стоимость приборов и теплового оборудования, \$	7600	20200

Таблица 2 – Варианты выработки энергии

Энергия	Вариант 1		Вариант 2	
	Оборудование	Цена, тыс. \$	Оборудование	Цена, тыс. \$
Электрическая	Панели, 30 кВт, 200 м <sup>2</sup>	28	Панели, 8 кВт, 70 м <sup>2</sup>	8,5
	Тепловая	Тепловой насос, 29,6 Гкал	Коллекторы, 90 м <sup>2</sup>	19
Дровяная печь			0,66 + 0,35/год	
Стоимость, \$	41000		28160 + 350 \$/год	

Вывод: вариант с использованием фотоэлектрических панелей, вакуумных коллекторов и дровяной печи является менее дорогостоящим, но при этом и менее комфортабельным и безопасным в процессе эксплуатации, а также имеет постоянные денежные и временные затраты на хранение и приобретение топлива для печи.

## **Расчет максимальных тяжений гибких шин 110 кВ при коротких замыканиях**

*МартинAITис А.Э.*

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.**

Оценка электродинамической стойкости расщепленных проводов воздушных линий заключается в проверке их схлестывания и механической прочности. Для проверки схлестывания нужно выявить наибольший размах колебаний при коротких замыканиях (КЗ). Небольшие (на порядок меньше междуфазных) расстояния между проводами расщепленной фазы обуславливают большие электродинамические усилия, действующие внутри расщепленной фазы при КЗ. Испытания в опытных пролетах показали, что при определенном сочетании конструктивных параметров расщепленной фазы и величины токов КЗ возникает схлестывание проводов. После схлестывания провода фазы двигаются под действием междуфазных электродинамических усилий (ЭДУ). В момент максимального стягивания проводов в пучке под действием внутрифазных ЭДУ происходит резкое увеличение тяжения фаз.

Под электродинамической стойкостью гибких проводов электроустановок понимают их способность противостоять электродинамическому действию токов КЗ до и после автоматического отключения цепи КЗ без повреждений. ПУЭ указывает на ток КЗ в 20 кА, по достижении которого необходимо производить расчет гибких шин на электродинамическую стойкость. С возрастанием токов КЗ их электродинамическое действие становится ключевым фактором, определяющим габариты и механические характеристики токоведущих конструкций с гибкими проводами при проектировании.

Анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований позволяет составить подробную картину поведения гибких проводов при КЗ. В траекториях движения проводов выделяют два участка. На первом проводе движутся с ускорением под действием электродинамических усилий (ЭДУ). Началом второго участка является положение провода в момент отключения КЗ. После отключения движение провода определяется сочетанием действия инерционных и упругих сил и тяжения провода. Из-за влияния температурных удлинений проводов, податливости опор, а также изменения формы проводов и гирлянд изоляторов траектории движения гибких проводников приобретают более сложную форму.

### **Литература**

1 Сергей, И.И. Упрощенный расчет максимальных тяжений проводов на двух стадиях их движения при коротком замыкании / И.И. Сергей, А.П. Андрукевич,

Е.Г. Пономаренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 6. – С. 12–26.

2 Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций : учеб. пособие для вузов /А.А. Васильев, И.П. Крючков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

## **Малое предпринимательство в энергетике Республики Беларусь**

*Матвейчук Д.Н., Михно Н.Ю.*

**Научный руководитель – к.э.н., доцент Манцерова Т.Ф.**

Энергетика Республики Беларусь – наиболее стабильно работающий комплекс белорусской экономики, которому принадлежит ключевая роль в стабильном развитии страны и ее экономики.

Республика Беларусь относится к категории стран, которые не обладают значительными собственными топливно-энергетическими ресурсами. Обеспеченность Республики собственными энергоресурсами находится на уровне 20 % потребности Республики в ТЭР, поэтому около 80 % всех потребляемых в стране ТЭР является импортируемыми.

Основным сырьем для производства тепловой и электрической энергии в Республике Беларусь является газ. При его сжигании производится около 80 % всего объема тепловой и электрической энергии.

В связи с необходимостью снижения затрат национальных производителей, Республика Беларусь увеличила долю потребления газа в энергетическом балансе с 43 % в 1990-х г. до 80 % к 2015 г. Это увеличило риски страны в плане энергетической безопасности не только по причине доминирующей роли природного газа в ТЭБ страны, но и потому что единственным поставщиком ресурса является Россия.

С целью обеспечения энергобезопасности и снижения энергоемкости ВВП в Республике Беларусь разработана государственная программа «Энергосбережение» на 2016–2020 гг., реализация которой предусматривает снижение энергоемкости ВВП к 2021 году на 60 % по отношению к 2005 году, увеличение доли местных ТЭР до 32 % и обеспечение экономии энергоресурсов не менее 5 млн. т у.т.

Согласно Концепции энергетической безопасности до 2035 г., ключевым пунктом является использование местных и альтернативных топливно-энергетических ресурсов. Основные из них – дрова, торф, гидроресурсы и биомасса. Однако доля ВИЭ в структуре производства тепловой и электрической энергии пока не превышает 2 %.

В балансе производства возобновляемых источников энергии в Беларуси самая большая доля приходится на использование древесного топлива. Так в 2015 году их доля составила около 95 %. В качестве топлива в основном используются топливная древесина, топливная щепа и древесные отходы. Доля энергии ветра, воды и солнца в общем объеме выработки пока не превышает 6 %.

Также стоит отметить, что в энергетическом секторе Республики Беларусь существует определенный дисбаланс цен на тепловую и электрическую энергию. Так цены для населения значительно ниже тарифов для юридических лиц.

Таким образом, одним из решений данной проблемы и повышения эффективности работы энергосистемы Республики Беларусь может стать возведение объектов малой энергетики, использующих альтернативные или возобновляемые источники энергии.

Развитие малых форм предпринимательской деятельности в энергетике позволит решить многие социально-экономические проблемы: создать и внедрить технологические инновации и высокоэффективное оборудование в энергетическое производство, повысить уровень занятости и деловой активности населения, обеспечивая стабильность развития экономики.

Ввиду развитого сельского и лесного хозяйства особое внимание стоит уделить развитию малых энергетических предприятий с использованием энергии биомассы: биогаза и древесных отходов.

Биогазовые комплексы позволяют вырабатывать электроэнергию из биогаза, получаемого при брожении органических отходов. Биогазовые установки производят электрическую и тепловую энергию, высококачественные удобрения, обеспечивают утилизацию отходов, сокращают выбросы метана в атмосферу. На 1 января 2016 года в Республике Беларусь действовало 17 биогазовых установок суммарной электрической мощностью около 22,7 МВт.

Площадь лесного фонда Беларуси составляет 9,36 млн. гектаров (38,8 % территории). К древесным топливным ресурсам относятся дрова, отходы лесозаготовок и деревообработки. Годовой объем использования дров, отходов лесопиления и деревообработки в качестве котельно-печного топлива в 2015 г. превысил 3,4 млн. т у.т. Всего в Беларуси на конец 2014 года действовало более 310 установок, работающих на энергии древесного топлива. Их установленная мощность составляет более 490 МВт. Основной объем энергии из биомассы производится на котельных и мини-ТЭЦ предприятий.

Стоит отметить, что на сегодняшний день доля малых энергетических предприятий на белорусском рынке, по разным оценкам, не превышает 0,1 % от числа организаций малого предпринимательства, тогда как в западных странах она составляет до 30 %. Это связано с неготовностью инвесторов вкладывать деньги в проекты, со сроками окупаемости около 10 лет.

Таким образом, создание взаимодействия крупных государственных предприятий с предприятиями малого и среднего энергетического бизнеса может привести к повышению эффективности генерации и реализации

энергии, а также способствовать дальнейшему экономическому развитию Республики Беларусь и повышению ее энергетической безопасности.

## Экранирование контрольных кабелей связи

*Муха В.О.*

**Научный руководитель – Гурьянчик О.А.**

Эксплуатируемое на электрических станциях и подстанциях оборудование подвергается воздействию многочисленных помех, источниками которых могут быть удары молнии, токи короткого замыкания, коммутации в высоковольтной и низковольтной сети, радиопередающие устройства, силовое оборудование, разряды статического электричества и т. д. Экранирование применяется там, где требуется защита от воздействия электромагнитных полей, которые образуются проходящими по кабелю токами или наоборот, защитить сигнал от внешних помех. Помимо основной задачи, экранирование может повышать прочность и стойкость изоляции, защищать от агрессивной внешней среды, заземлять кабель, а при эксплуатации в муфте сводит к минимуму возможность появления электрических потенциалов на поверхности кабеля.

Экран кабеля располагается между сердечником и внешней оболочкой. В случае, если кабель многожильный, экран может обвивать все жилы одновременно или, в случае, если необходимо избежать влияния сигналов одной жилы на другую, каждую жилу отдельно.

Существует множество различных вариантов экранирования, каждый тип имеет свои преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать для выбора наиболее подходящего и экономичного варианта. В работе осуществляется сравнение различных типов экранов, отражены их преимущества и недостатки.

Оплетка сохраняет хорошую гибкость кабеля и имеет большой срок службы. Она отлично препятствует влиянию низкочастотных помех и имеет меньшее сопротивление, чем фольга, для постоянного тока. Данный тип экрана подходит для аудио кабелей и кабелей, передающих информацию в радиочастотном диапазоне. Чем больше процент перекрытия, тем эффективнее экранировка.

Пленочные экраны состоят из алюминиевой фольги, покрытой слоем полипропилена или полиэфира. Они полностью покрывают проводник, дешевле, легче и тоньше. Благодаря малой толщине фольгу удобно использовать для экранирования отдельных компонентов кабеля. При помощи клея ее легко соединить с внешней оболочкой или слоем диэлектрика. Пленочный экран лучше борется с помехами на высоких частотах, но при частых изгибах имеет короткий срок службы. Для того чтобы в конструкции экрана из фольги отсутствовал шов, через который может проходить

электромагнитное поле, вызывающее помехи, один из краев фольги складывается, обеспечивая замыкающий слой.

Комбинированный экран, состоящий из нескольких защитных слоев, позволяет эффективно бороться с помехами во всем частотном диапазоне. Сочетание фольги и оплетки позволяет обеспечить стопроцентное покрытие кабеля экраном и высокую гибкость, прочность и низкое сопротивление постоянному току.

Кабель должен обеспечивать защиту не только от электрических воздействий, но и от механических повреждений при монтаже и эксплуатации. Дополнительную механическую защиту обеспечивает бронирование. Бронирование осуществляется двумя методами, либо добавлением слоя гофры из алюминия или стали, что принято в США, либо оплетки из стальных проволок, что характерно для Европы.



## **Применение цифровых программно-аппаратных комплексов RTDS**

*Мишар Д.И., Рабушко П.С.*

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Румянцев В.Ю.**

RTDS (Real Time Digital Simulator) – это специализированный комплекс, предназначенный для изучения стационарных режимов и электромагнитных переходных процессов в электроэнергетической системе в реальном масштабе времени. Исследования электроэнергетических систем высокого напряжения переменного и постоянного тока выполняются путем цифрового моделирования процессов с использованием различных алгоритмов.

RTDS позволяет решать следующие задачи:

- полный цикл проверки релейной защиты, единой защиты и схем управления;
- изучение работы систем переменного тока, включая режим генерации и передачи электрической энергии;
- исследование взаимодействия оборудования для энергетики;
- изучение взаимодействия между объединенными системами постоянного и переменного тока;
- обучение и тренировка инженерно-технического персонала объектов электроэнергетики.

Через устройства ввода-вывода к RTDS подключается различное внешнее оборудование, такое как измерительные устройства, релейная защита и контроллеры, например, устройства управления регулируемых электроприводов или управляемых компенсаторов реактивной мощности. При этом условия функционирования подключенного оборудования соответствуют реальным условиям. Это позволяет тестировать функционирование устройств без их включения в реальную энергосистему.

Программное обеспечение RTDS включает в себя мощный графический интерфейс пользователя RSCAD. Этот программный пакет разработчика обеспечивает полный набор графических интерфейсов для работы с RTDS. Подготовка моделей электроэнергетических систем, для последующего их запуска на RTDS, осуществляется в графическом интерфейсе пользователя RSCAD.

Важнейшим преимуществом RTDS является возможность представить в модели электрической системы, в частности, средства релейной защиты, автоматики и управления как в виде запрограммированных внутренних блоков RTDS, так и в виде реальных терминалов.

Цифровые программно-аппаратные комплексы RTDS применяются в следующих областях:

- для исследований электромагнитных и электромеханических переходных процессов в электрических сетях, генераторах и нагрузках;
- для проверки и исследований вторичного оборудования в режиме реального времени с жесткой обратной связью;
- для исследования и разработки силовых полупроводниковых комплексов.

Комплексы RTDS являются мировым эталоном для выполнения моделирования систем электроснабжения в реальном времени. Применение RTDS позволяет лучше представить переходные процессы в энергосистемах, плотнее увязать эти процессы с функционированием вторичной аппаратуры. Симуляторы дают возможность существенно повысить качество подготовки персонала служб РЗА, АСУ, специалистов, занимающихся SCADA-системами и телемеханикой. Являясь универсальным устройством, RTDS позволяет заменить целый ряд специализированных тренажеров.

Комплексы RTDS широко используются в обучающих целях для проведения занятий со студентами вузов, а также для повышения квалификации персонала энергопредприятий.

## Газопоршневые установки

*Николаенко Д.В.*

**Научный руководитель – Кисляков А.Ю.**

Газопоршневые установки – универсальные генерирующие устройства, предназначенные для удовлетворения энергетических потребностей. Они могут быть как источниками автономного гарантированного энергоснабжения, если отсутствует доступ для подключения к централизованным сетям, так и эффективно работать в параллель с этими сетями для снижения энергозатрат.

Преимущества газопоршневых установок:

- низкая себестоимость вырабатываемой энергии за счет низкой стоимости, экономичного расхода энергоносителя (природного газа), и низких затрат на техническое обслуживание и эксплуатационные материалы;

- низкие сроки окупаемости оборудования от 3 до 5 лет за счет низкой себестоимости вырабатываемой энергии, которая на 30–40 % ниже цены электроэнергии у сетевых поставщиков;

- экономия до 40 % энергоносителя за счет одновременной выработки электрической и тепловой энергии по сравнению с традиционными раздельными способами производства на ТЭЦ;

- длительный срок службы газопоршневых установок, составляющий до 300 тысяч моточасов, за счет высокой ремонтпригодности;

- высокая степень работоспособности за счет постоянной круглогодичной эксплуатации в режиме до 8000 часов в год;

- широкий диапазон мощностей газопоршневых установок от 140 до 4300 кВт электрической энергии;

- незначительные потери при передаче энергии за счет непосредственной близости генерирующего оборудования к конечному потребителю и минимизация затрат на сооружение инженерных сетей;

- пониженный объем выбросов вредных веществ в окружающую среду по сравнению с традиционными видами выработки энергии на угле;

- максимальная автоматизация управления и широкий выбор средств диспетчеризации.

ГПУ могут работать на газах различных типов:

- природный газ Пропан;

- факельный газ;

- газ сточных вод;

- биогаз;

- газ мусорных свалок;

- коксовый газ;

– попутный газ.

Основным назначением работы ГПУ является выработка электроэнергии, а также когенерация и тригенерация.

Когенерация – непосредственное использование тепловой энергии конечными потребителями (горячее водоснабжение (ГВС), отопление, технологические нужды).

Тригенерация – частичное преобразование тепловой энергии в энергию холода (холод вырабатывается абсорбционной холодильной машиной, потребляющей не электрическую, а тепловую энергию, что дает возможность достаточно эффективно использовать тепло летом для кондиционирования помещений или для технологических нужд).

#### **Литература**

1 Гительман, Л.Д. Энергетический бизнес / Л.Д. Гительман. – М. : Дело, 2006. – 600 с.

2 Самойлов, М.В. Основы энергосбережения : учеб. пособие / М.В. Самойлов, В.В. Паневчик, А.Н. Ковалев. – 2-е изд. – Минск : БГЭУ, 2002. – 198 с.

## **Типы и принципы работы стабилизаторов переменного сетевого напряжения**

*Павлюкевич Е.Н., Шаповалова И.А.*

**Научный руководитель – Михальцевич Г.А.**

Стабилизаторы переменного напряжения – это устройства, предназначенные для поддержания среднего значения напряжения на выходе в заданных пределах, при определенных его колебаниях во входной цепи. Стабилизаторы можно разделить на два больших вида:

1. Стабилизаторы, накапливающие энергию и далее заново генерирующие её в виде стабильного напряжения.

2. Стабилизаторы, корректирующие напряжение, добавляя дополнительный потенциал, приводящий величину напряжения к номинальному значению.

**Стабилизаторы, накапливающие энергию и далее заново генерирующие её в виде стабильного напряжения.**

– Стабилизатор напряжения системы «двигатель – генератор».

Этот стабилизатор работает по принципу преобразования электроэнергии в кинетическую электродвигателем и далее преобразования её обратно в электрическую с помощью генератора. Такие стабилизаторы обычно применяются для стабилизации напряжения в трехфазных системах напряжения.

– Феррорезонансные стабилизаторы.

В феррорезонансных стабилизаторах происходят электромагнитные колебания в колебательном контуре ёмкости и индуктивности. Данный вид стабилизаторов может применяться в комплексе с механизмами, вносящими сильные помехи в электросеть.

– Стабилизаторы инверторного типа.

Стабилизаторы напряжения инверторного типа преобразуют переменное напряжение в постоянное с помощью выпрямителя и накапливают энергию, заряжая промежуточные ёмкости схемы. Далее с помощью электронного генератора преобразуют постоянное напряжение опять в переменное, но уже с устойчивыми характеристиками. Данные устройства успешно применяют для обеспечения работы медицинского, спортивного и некоторого другого оборудования.

– Источники бесперебойного питания.

Источники бесперебойного питания накапливают энергию в аккумуляторах. После этого, с помощью собственного генератора выдают напряжение с нужными характеристиками. Устройства бесперебойного питания популярны для работы в комплексе с вычислительной техникой.

**Стабилизаторы, корректирующие напряжение, добавляя дополнительный потенциал, приводящий величину напряжения к номинальному значению.**

– Ферромагнитные стабилизаторы.

Феррорезонансный стабилизатор состоит из двух дросселей: с ненасыщенным сердечником и насыщенным, а также конденсатора. Подбором параметров дросселей и конденсаторов можно обеспечить стабилизацию напряжения при изменении входного напряжения в достаточно широких пределах, но незначительное отклонение частоты питающей сети очень сильно влияет на характеристики стабилизатора.

– Электромеханические стабилизаторы напряжения.

Регулировка напряжения в электромеханических стабилизаторах осуществляется автоматически, путём перемещения токосъёмного узла по обмотке трансформатора, что обеспечивает плавное изменение коэффициента его трансформации до достижения заданной величины выходного напряжения. Стабилизаторы этого типа обладают достаточно высокой точностью удержания выходного напряжения (2–3 %) и обеспечивают наиболее комфортный режим питания бытовой техники. Они обладают низким быстродействием из-за инертности механической регулировки

– Электронные стабилизаторы напряжения.

Эти стабилизаторы разделяются на ступенчатые и непрерывного действия. Электронные ступенчатые стабилизаторы регулируют напряжение, переключая обмотки специального трансформатора посредством электронных ключей. Ключи управляются блоком управления с процессором или без него по специальной программе. Стабилизаторы имеют большое быстродействие, поэтому применяются в комплексе с дорогостоящим оборудованием, требующим защиты от различных аномалий в сети.

– Электронные стабилизаторы непрерывного действия регулируют напряжение, изменяя либо сопротивление регулирующего элемента, как правило – транзистора, либо включая и выключая регулирующий элемент с высокой частотой (десятки килогерц), и управляя временем включенного и выключенного состояния регулирующего элемента (чаще всего IGBT-транзистора).

– Релейно-трансформаторные стабилизаторы.

Релейно-трансформаторные стабилизаторы являются наиболее распространёнными ввиду простоты изготовления, отсутствия дефицитных элементов и простоты достижения большой выходной мощности (в несколько киловатт).

## **Влияние тепловых электрических станций на окружающую среду**

*Панас Н.М., Ковалевич П.В.*

**Научные руководители – к.э.н., доцент Манцерова Т.Ф., Лапченко Д.А.**

Современную действительность можно назвать эпохой трех «Э»: экономика, энергетика, экология. Эти три понятия тесно связаны между собой. Экономика – это совокупность отношений, связанных с производством и всей хозяйственной деятельностью человека. Энергетика – область экономической деятельности человека, охватывающая преобразование, распределение и использование энергетических ресурсов всех видов. Экология – это наука, изучающая закономерности взаимоотношений организмов между собой и с окружающей средой.

Энергетика сегодня является определяющей и для экономики, и для экологии. Именно от нее в значительной мере зависит экономический потенциал всех стран и благосостояние населения. В то же время она оказывает сильное воздействие на окружающую среду и биосферу в целом. Самые актуальные экологические проблемы (изменение климата, кислотные дожди, общее загрязнение среды) прямо или косвенно связаны с использованием или производством энергии.

Основной экологической проблемой для любого государства являются загрязняющие выбросы энергетических объектов. В Республике Беларусь главные энергетические загрязнители окружающей среды – это тепловые электрические станции (ТЭС). ТЭС получают электрическую энергию в результате преобразования тепловой энергии, выделяющейся при сжигании ископаемого топлива. В качестве топлива на тепловых электростанциях используют уголь, нефть и нефтепродукты, природный газ, реже – древесину и торф. К первоочередным факторам негативного воздействия ТЭС относятся выбросы твердых веществ (11,35 %), оксида углерода (26,12 %), диоксида серы (7,21 %), оксидов азота (31,07 %), углеводородов (20,19 %), неметановых летучих органических соединений (1,76 %) и прочих веществ (2,3 %) в атмосферу, сбросы загрязняющих веществ в водоемы. Всего за 2015 год в атмосферный воздух было выброшено 62,4 тыс. тонн загрязняющих веществ. По данным Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь по сравнению с 2014 г. количество выбросов уменьшилось на 9,93 тыс. тонн, или на 13,73 %.

К методам снижения выбросов в окружающую среду от ТЭС относятся пылеулавливание, использование электрофильтров и скрубберов, сероочистительных установок, систем азотоочистки, метод рециркуляции дымо-

вых газов, ступенчатое сжигание топлива. Внедрение этих современных технологий позволит снизить выбросы загрязняющих веществ до 30 %.

Использование методов снижения вредных выбросов в атмосферу приведет к уменьшению экологического налога. И, как следствие, к снижению себестоимости электрической и тепловой энергии на ТЭС.

В настоящее время проблема взаимодействия энергетических объектов и окружающей среды не только остается актуальной, но и приобретает новые черты, оказывая влияние как на атмосферу и гидросферу Земли, так и на экономику предприятий и государства.



## Газотурбинные установки

*Петрашко В.Ю.*

**Научный руководитель – Кисляков А.Ю.**

Газотурбинные установки (ГТУ) – имеют единичную электрическую мощность от двадцати киловатт и до нескольких десятков мегаватт – это классические газовые турбины.

Электрический КПД современных газотурбинных установок составляет 33–39 %. КПД газотурбинных установок, в целом ниже, чем у газопоршневых силовых агрегатов. Но с газотурбинными установками значительно упрощается задача получения высокой мощности электростанции. При реализации всего теплового потенциала газовых турбин значимость высокого электрического КПД для потребителей становится менее актуальной. С учетом высокой температуры выхлопных газов в мощных газотурбинных установках имеется возможность комбинированного использования газовых и паровых турбин. Такой инженерный подход позволяет существенно повысить эффективность использования топлива и увеличивает электрический КПД установок до 57–59 %. Этот способ хорош, но ведет к удорожанию и усложнению проекта.

Режим работы электростанции, с использованием сопутствующей тепловой энергии имеет свой технический термин – когенерация.

Возможность получения от газотурбинных установок больших количеств бесплатной тепловой энергии предполагает возврат более быстрый возврат.

Применение газотурбинных установок в качестве силового оборудования для мощных ТЭС и мини-ТЭЦ оправдано экономически, так как на сегодняшний день электростанции, работающие на газовом топливе, имеют наиболее привлекательную для потребителя удельную стоимость строительства и низкие затраты при последующей эксплуатации.

Избытки бесплатной тепловой энергии в любое время года дают возможность, посредством чиллеров без затрат электричества, наладить полноценное кондиционирование помещений любого назначения. Охлажденный таким образом теплоноситель можно применять в промышленных целях, в различных производственных циклах. Эта технология называется тригенерация.

Эффективность использования ГТУ обеспечивается в широком диапазоне электрических нагрузок от минимальных 1–3 % до максимальных 110–115 %.

### Литература

1 Могильницкий, И.П. Газотурбинные установки / И.П. Могильницкий, В.П. Ларионов. – М. : Энергоиздат, 1999.

2 Пешков, И.Б. Газотурбинные установки / И.Б. Пешков, Г.И. Мещанов, М.К. Каменский. – М. : Энергоиздат, 2007.

## Особенности моделирования в реальном времени

Плющев Б.В., Рабушко П.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Румянцев В.Ю.

В результате воздействия различных факторов, современные энергосистемы становятся все более сложными, что во многом связано с необходимостью учета экономических и экологических аспектов. Одним из способов обеспечения наиболее оперативной разработки и тестирования с сохранением высокого качества выполняемой работы является использование так называемого моделирования энергосистемы в реальном времени.

RTDS (*RealTimeDigitalSimulator*) – цифровые программно-аппаратные комплексы моделирования энергосистем в режиме реального времени. Основные задачи, решаемые с применением RTDS:

- Моделирование в режиме жесткого реального времени энергетических систем различной конфигурации, включающих как традиционные элементы (генераторы, трансформаторы, линии), так и современные внедряемые устройства (силовые полупроводниковые комплексы).

- Детальное исследование режимов (установившихся режимов, электромагнитных и электромеханических переходных процессов) систем переменного и постоянного тока, в том числе с использованием физического оборудования, подключенного с жесткой обратной связью, сохранение и повторное воспроизведение результатов моделирования.

- Всесторонние испытания реального оборудования в условиях, максимально близких к тем, которые имеют место в реальных энергосистемах.

- Разработка и проверка алгоритмов действия устройств управления, регулирования и защиты.

Порядок работы с комплексом RTDS:

- Разработка модели. Разработка модели энергосистемы производится посредством графического редактора на ПК, не связанном с RTDS. После завершения разработки модели ПК подключается к RTDS.

- Отладка модели. Отладка модели осуществляется посредством сравнения результатов моделирования с результатами аналитических расчетов, с результатами, полученными на ранее проверенных моделях, с экспериментальными данными. Имеется возможность легкого и быстрого переключения симулятора от одного пользователя к другому.

- Исследование оборудования. К отлаженной модели подключается исследуемое оборудование.

Особенности моделирования в реальном времени с помощью RTDS: используются параллельные вычисления на нескольких процессорах (в традиционном компьютерном моделировании обычно используется один

вычислительный процессор); темп выполнения расчетов задается высокостабильным тактовым генератором; моделирование поведения системы в течение, например, 1 с выполняется ровно 1 с; в системах жесткого реального времени все расчеты, необходимые для определения состояния модели и обработка состояний портов ввода/вывода, завершаются строго в течение заданного шага расчета (в традиционном компьютерном моделировании продолжительность расчетов на каждом шаге значительно больше заданного шага).

Комплексы *RTDS* – это мощный инструмент для решения инженерных и исследовательских задач в энергетике и электротехнике. Они моделируют энергосистему в режиме реального времени, что позволяет исследовать работу энергосистем, применяя как виртуальные элементы, так и реальные устройства. При помощи данных комплексов можно проводить всесторонние испытания вторичного оборудования в условиях, максимально близких к реальным.

## **Роль энергетической безопасности и энергоэффективности как необходимого и достаточного условия устойчивого развития**

*Полюхович А.Д., Озерец Ю.В.*

**Научный руководитель – Кравчук Е.А.**

Энергетическая безопасность и энергоэффективность в настоящее время являются актуальными темами для современного мира. Энергетическая безопасность подразумевает определенные условия, при которых потребитель имеет своевременный и надежный доступ к необходимой ему энергии, а поставщик – к её потенциальным потребителям. Однако выясняется, что нет энергобезопасности потребителей и энергобезопасности поставщиков, взятых в отдельности. Есть энергобезопасность, распространяемая на всех, и нельзя обеспечить ее только в отдельно взятой стране. Речь идет о техногенных катастрофах, которые не могут быть заключены в границы одной страны. Они не имеют четко определенной территориальной зависимости в рамках одного государства, а распространяются в определенных масштабах. Поэтому мы можем говорить о возникновении процесса глобализации энергоэффективности как необходимого условия для дальнейшего безопасного существования не только одной страны, но и соседствующих государств. Энергетическую безопасность можно рассматривать как важный фактор национальной безопасности и экономической стабильности нашей страны. Это связано с постоянным подорожанием импортируемых в Республику Беларусь энергетических ресурсов. Значение энергетики глобально, ибо она обеспечивает функционирование всех сфер экономики, обороны, социальной жизни, экологии и пр.

Понятие энергоэффективности подразумевает под собой рациональное использование энергетических ресурсов. Самообеспечение ими в Республике Беларусь находится на недостаточном уровне для поддержания энергетической стабильности. Являясь энергозависимой страной, мы вынуждены импортировать около 80 % потребляемых топливно-энергетических ресурсов. Для снижения энергозависимости в Республике Беларусь существует направление развития возобновляемых источников энергии, таких как ветряная энергия, энергия солнечных лучей, гидроэнергия. Стоит отметить, что хотя доля возобновляемых источников энергии в структуре добычи и конечного потребления энергии мала, в последние годы она имеет тенденцию к росту. Самым актуальным направлением в развитии энергоэффективности нашей страны в настоящее время является развитие ядерной энергетики. В соответствии с прогнозами специалистов в данной области, она должна обеспечить повышение уровня энергетической безо-

пасности за счет диверсификации энергоисточников, а также заместить до 5 млн. т у.т. (природного газа) в балансе энергосистемы. Главным преимуществом такого вида станций является практическая независимость от источников топлива из-за небольшого объема используемого топлива, ее относительная экологическая чистота. На ТЭС суммарные годовые выбросы вредных веществ, в которые входят сернистый газ, оксиды азота, оксиды углерода, углеводороды, альдегиды и золовая пыль, на 1 000 МВт установленной мощности составляют примерно от 13 000 тонн в год на газовых и до 165 000 тонн на пылеугольных ТЭС. Подобные выбросы на АЭС возникают в редких случаях задействования резервных дизельных генераторов. Единственный фактор, в котором АЭС уступают в экологическом плане – тепловое загрязнение, вызванное большими расходами технической воды для охлаждения конденсаторов турбин, которое у АЭС несколько выше из-за более низкого КПД. После выработки ресурса, АЭС сталкивается с необходимостью ее ликвидации. Это является еще одним глобальным вопросом, который требует быстрого и экономичного решения (ликвидация выработанного ресурса может составить до 20 % от стоимости их строительства). Важным показателем в использовании энергии, вырабатываемой АЭС, является ее срок эксплуатации. Он составляет от 30 до 40 лет, однако может изменяться, так как данные значения устанавливаются правительством конкретной страны. Несмотря на преимущества атомной электростанции, существует ряд ее недостатков, главными из которых являются тяжелые последствия возможных аварий, для исключения которых АЭС оборудуются сложнейшими системами безопасности с многократными запасами и резервированием, обеспечивающими исключение расплавления активной зоны даже в случае максимальной проектной аварии. Несоблюдение правил энергетической безопасности при эксплуатации АЭС может привести к необратимым последствиям. Ярким примером является катастрофа на Чернобыльской АЭС.

Изучив вопрос энергоэффективности и энергобезопасности, можно сказать, что эти процессы входят в область исследования многих стран мира и отвечают интересам в общечеловеческом масштабе. Следует отметить, что эти направления можно отнести к обязательному условию, которое должно соблюдаться как подтверждение гуманного отношения к жизни человека, к обеспечению его безопасности. Преследуя данную цель, в настоящее время наша страна ищет выход из создавшегося положения, связанного с серьезным энергетическим вызовом, продиктованным ускоренным экономическим ростом, необходимостью повышения конкурентоспособности на мировом рынке.

## **RTDS – цифровые моделирующие комплексы реального времени**

*Рабушко П.С.*

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.**

Повышение качества и надежности энергетического оборудования неразрывно связано с применением на всех этапах его жизненного цикла современных цифровых технологий, а также методов математического моделирования энергетических систем.

RTDS – это специализированный комплекс, предназначенный для изучения стационарных режимов и электромагнитных переходных процессов в ЭС в реальном масштабе времени. Исследования ЭС высокого напряжения переменного и постоянного тока выполняются путем цифрового моделирования процессов с использованием алгоритмов.

RTDS позволяет решать следующие задачи:

- полный цикл проверки релейной защиты, единой защиты и схем управления;
- полный цикл проверки систем управления для электрических систем постоянного тока, статических регулируемых компенсаторов, тиристорно-управляемых последовательных конденсаторов и синхронных машин;
- разработка устройств гибких систем передачи электроэнергии переменным током и связанных с ней средств управления;
- изучение работы систем переменного тока, включая режим генерации и передачи электрической энергии;
- исследование взаимодействия оборудования для энергетики;
- изучение взаимодействия между объединенными системами постоянного и переменного тока;
- обучение и тренировка инженерно-технического персонала объектов электроэнергетики.

Через устройства ввода-вывода к RTDS подключается различное внешнее оборудование, такое как измерительные устройства, релейная защита и контроллеры, например, устройства управления регулируемых электроприводов или управляемых компенсаторов реактивной мощности. При этом условия функционирования подключенного оборудования соответствуют реальным условиям. Это позволяет тестировать функционирование устройств без их включения в реальную энергосистему.

Модели электрических систем формируются из моделей отдельных элементов. Важнейшим преимуществом RTDS является возможность представить в модели электрической системы, в частности, средства релейной защиты, автоматики и управления как в виде запрограммирован-

ных внутренних блоков RTDS, так и в виде реальных терминалов (контроллеров), которые соединяются с симулятором через аналоговые и цифровые порты ввода-вывода.

Устройства релейной защиты были первыми пользователями цифрового моделирования замкнутого цикла в реальном времени. Сегодня практически невозможно представить реализацию современных интеллектуальных устройств защиты и управления сетей со сложной конфигурацией без проверки этих устройств, оптимизации их уставок и конфигураций без помощи цифрового моделирования.

Цифровое моделирование замкнутого цикла в реальном времени является самым надежным методом наиболее оперативной разработки и тестирования для реализации новых технологий в современных энергосистемах.

На данный момент системы моделирования в реальном времени имеют довольно широкое распространение в мире. Поставлено около 250 комплексов, состоящих из более чем 1100 вычислительных кассет в 36 стран мира, в том числе 8 из них в Россию. На территории Беларуси подобных комплексов не имеется, однако проводятся семинары о целесообразности их приобретения.



## **Цифровое моделирование в реальном времени**

*Рабушко П.С.*

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.**

Разработка цифровых моделей энергетических систем для расчета электромагнитных и электромеханических процессов с высокой степенью адекватности процессам в физических объектах исследования – сложная задача.

Время, необходимое для полного цифрового расчета, зависит от различных факторов, например: размера моделируемой энергосистемы, характеристик анализируемых переходных процессов, числа точек наблюдения и от производительности используемых компьютеров.

Время вычисления каждого временного интервала превышает время, необходимое для смоделированного процесса на самом деле, таким образом, моделирование в целом может занимать несколько секунд или даже минут. Такого рода моделирование осуществляется в автономном режиме и называется автономным или независимым моделированием. Результаты обычно сохраняются в файлах и отображаются графически в виде временных диаграмм для последующего анализа или воспроизведения на специальном испытательном оборудовании и аналоговых усилителях непосредственно в тестируемое оборудование.

Время вычисления равно или меньше каждого временного шага в моделируемом процессе. Таким образом, результат каждого временного шага доступен в оперативном режиме в реальном времени, как если бы процесс запускался в естественной среде в реальной энергосистеме. Результат также можно сохранить в файлах и просмотреть позднее в графическом виде или воспроизвести различными способами. Самым большим преимуществом моделирования в реальном времени является возможность объединения в замкнутый цикл различного аппаратного обеспечения и изучения его функционирования, как если бы данное аппаратное обеспечение было установлено непосредственно в реальной энергосистеме. Такой вид моделирования называется цифровым моделированием замкнутого цикла в реальном времени (CSRTDS) или моделирование с аппаратными средствами в контуре (HIL-моделирование). Одним из важных требований, предъявляемых к данному виду моделирования, является строгий контроль временных шагов на протяжении всего времени в заданных пределах, в противном случае полученные результаты рискуют оказаться недостоверными.

Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Моделирование не в реальном времени не требует высокопроизводительных компьютеров, сохраненные файлы можно позднее воспроизвести на испытательном обо-

рудовании, используя различные промежуточные аппаратные средства. Недостатком является то, что нет возможности проанализировать непосредственный отклик смоделированной системы на определенные воздействия со стороны испытательного оборудования во время конкретного события. С другой стороны, автономное моделирование дает возможность проанализировать чрезвычайно быстрые переходные процессы, которые невозможно смоделировать сегодня даже с использованием самых лучших компьютеров.

На рисунке 1 показан типовой пример используемого оборудования и необходимые подключения для тестирования в реальном времени реле защиты. Такая проверка была одним из первых практических применений тестирования в реальном времени с аппаратными средствами в контуре.

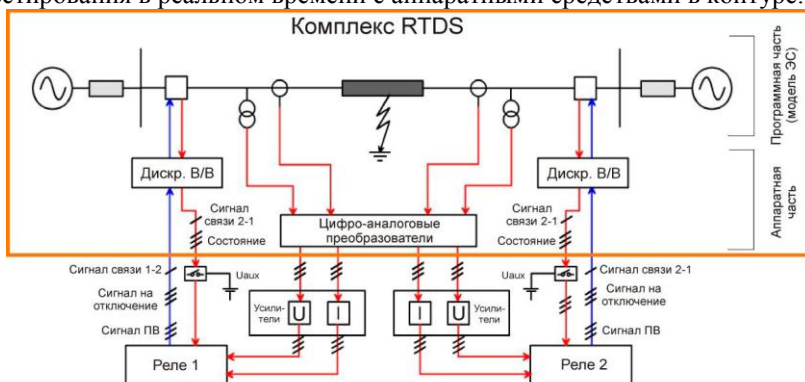


Рисунок 1 – Цифровое тестирование замкнутого цикла в реальном времени реле защиты в энергосистеме

Результаты цифрового моделирования используются в качестве входных сигналов для высокоточных цифро-аналоговых преобразователей и в качестве цифровых выходных сигналов. После этого преобразованные значения токов и напряжений усиливаются в усилителях мощности, вследствие чего тестируемые реле получают на свои аналоговые входы те же величины, которые были бы получены на реальной подстанции. Проверяемые реле реагируют на смоделированные события и посылают различную информацию обратно в симулятор через его дискретные входы, что изменит в реальном времени условия работы системы и продолжит моделирование в новых условиях. Выбранный временной шаг для таких случаев обычно составляет примерно 50 мкс (400 вычислений на цикл при номинальной частоте 50 Гц).

## Показатели качества электроэнергии

*Рожко А.С.*

Научный руководитель – Сапожникова А.Г.

Качество электроэнергии – степень соответствия параметров электрической энергии, к их установленным значениям. В свою очередь, параметр электрической энергии – величина, количественно характеризующая какое-либо свойство электрической энергии. Под параметрами электрической энергии понимают напряжение, частоту, форму кривой электрического тока.

ГОСТ 13109-99 устанавливает показатели и нормы качества электрической энергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в точках, к которым присоединяются электрические сети, находящиеся в собственности различных потребителей, или приемники электрической энергии (точки общего присоединения).

Этот ГОСТ устанавливает 11 основных показателей качества электроэнергии:

- отклонение частоты  $\delta f$ ;
- установившееся отклонение напряжения  $\delta U_y$ ;
- размах изменения напряжения  $\delta U_1$ ;
- дозу фликера (мерцания или колебания)  $P_f$ ;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_u$ ;
- коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_U$ ;
- коэффициент несимметрии напряжений обратной последовательности  $K_{2U}'$ ;
- коэффициент несимметрии напряжений нулевой последовательности  $K_{0U}$ ;
- глубину и длительность провала напряжения  $\delta U_n, \Delta t_n$ ;
- импульсное напряжение  $U_{имп}$ ;
- коэффициент временного перенапряжения  $K_{перU}$ .

Качество электрической энергии может меняться в зависимости от времени суток, климатических условий, изменения нагрузки энергосистемы, возникновения аварийных режимов в сети.

Снижение качества электрической энергии может привести к заметным изменениям режимов работы электроприемников и в результате уменьшению производительности рабочих механизмов, ухудшению качества продукции, сокращению срока службы электрооборудования, повышению вероятности аварий.

К основным задачам измерения и анализа показателей качества электроэнергии относятся: обнаружение помех и их оценка, регистрация измеренных числовых характеристик в целях обработки и отображения результатов, оценка измеренных значений показателей качества электроэнергии на соответствие установленным требованиям, определение источника помех, проведение коммерческих расчетов между поставщиком и потребителем электроэнергии. Для организации измерений необходимо определить вид контроля, точку осуществления измерений и виды контролируемых показателей качества электроэнергии.

## **Программы, применяемые для визуализации языков программирования**

*Румянцев В.О., Мишар Д.И.*

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.**

Ladder Diagram – язык релейной (лестничной) логики предназначен для программирования промышленных контроллеров (ПЛК). Синтаксис языка удобен для замены логических схем, выполненных на релейной технике. Ориентирован на инженеров по автоматизации, работающих на промышленных предприятиях. Обеспечивает наглядный интерфейс логики работы контроллера, облегчающий не только задачи собственно программирования и ввода в эксплуатацию, но и быстрый поиск неполадок в подключаемом к контроллеру оборудовании.

Программа на языке релейной логики имеет наглядный и интуитивно понятный инженерам-электрикам графический интерфейс, представляющий логические операции, как электрическую цепь с замкнутыми и разомкнутыми контактами. Протекание или отсутствие тока в этой цепи соответствует результату логической операции (истина – если ток течет; ложь – если ток не течет).

Различаются нормально замкнутые и нормально разомкнутые контактные элементы, которые можно сопоставить с нормально замкнутыми и нормально разомкнутыми кнопками в электрических цепях.

VisSim – визуальный язык программирования, предназначенный для моделирования динамических систем, а также проектирования, базирующегося на моделях, для встроенных микропроцессоров. VisSim сочетает в себе характерный для Windows интуитивный интерфейс для создания блочных диаграмм и мощное моделирующее ядро. Язык разработан американской компанией VisualSolutions, которая находится в Уэстфорде.

Язык и программная среда VisSim широко используется в разработке систем управления и цифровой обработки сигналов для моделирования и дизайна. Она включает в себя блоки для арифметики, булевых и трансцендентных функций, а также цифровые фильтры, передаточные функции, численного интегрирования и интерактивного вывода.

Программный комплекс JMCAD успешно применяется для проектирования систем автоматического управления, следящих приводов и роботоманипуляторов, тепловых энергетических установок, а также для решения нестационарных краевых задач (теплопроводность, гидродинамика и др.).

Широко используется в учебном процессе, позволяя моделировать различные явления в физике, электротехнике, в динамике машин и механиз-

мов и т. д. Может функционировать в кластерах, в том числе и в режиме удаленного доступа к технологическим и информационным ресурсам.

Версии JMCAD доступны с исходными текстами ядра, библиотек и является открытой системой с полной документацией и набором демонстрационных примеров. Также в состав комплекса входят модули для обеспечения максимальной производительности и контроля в реальном времени (JMCADRTS, JMCADRTC).

#### **Литература**

1 Ахметзянов, И.М. Визуальное программирование /И.М. Ахметзянов, И.К. Ракова, В.Н. Гусев // Программирование... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 6. – С. 121–126.

2 Баранов, В.Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы / В.Н. Баранов. – 2-е изд., испр. – М. : Издательский дом «Додэка», 2006. – 288 с.

## **PR и коммуникационное агентство в энергетике**

*Русецкая М.И.*

**Научный руководитель – Кравчук Е.А.**

В современном мире одним из факторов, определяющим поступательное движение общественного производства, является энергетика. Строительство новой ТЭС или АЭС даёт не только новые рабочие места, но и формирует имидж страны. Всё это говорит о высоких требованиях, которые предъявляются к специалистам, в том числе и специалистам PR.

В топливно-энергетическом комплексе можно выделить две основные задачи PR. Во-первых, установить контакты с тремя общественными группами – заказчиками, акционерами и сотрудниками. Во-вторых, необходимо грамотно продвигать услуги и товары компании в условиях жесткой конкуренции. Однако маркетинговые коммуникации в энергетической сфере значительно отличается от промышленного, коммерческого, банковского или других. Они обладают рядом особенностей, а именно рядом факторов, которые либо противоречат, либо способствуют продвижению:

- политические факторы;
- экономические изменения;
- социальные факторы;
- наличие новейших (экологических, энергосберегающих и др.) технологий.

Всё выше перечисленное является предпосылками для создания коммуникационного агентства, персонал которого будет разбираться во всех тонкостях сферы энергетики, обучать других. И в этом есть свои плюсы.

Одним из основных элементов работы такого агентства является организация поддержки и освещения важных для компании мероприятий, к примеру, запуска нового энергоблока на станции. В большинстве подобных мероприятий на пиарщиков ложиться просто огромная нагрузка, и в таком случае действительно эффективнее отдать черновую работу специализированному подрядчику, чем загружать свой персонал столь большими объемами работ.

Второй плюс – это подготовка кадров. Получив опыт и изучив всю сферу деятельности, PR-специалист выходит из агентства, способным эффективно решать разные задачи (общение со СМИ, создание имиджа предприятия, благотворительность и спонсорство, внутрикорпоративный PR) одновременно и быстро. Привлечение и грамотное управление таким кадровым составом позволит как сохранить их высокую функциональную эффективность, так и со временем сформировать из них компетентных отраслевых специалистов.

И третий плюс, который в первую очередь касается производителей энергетического оборудования. Развитие компании предусматривает освоение новых рынков сбыта продукции. В данном случае эффективным решением может послужить предварительная обработка нового информационного поля еще до открытия торгового представительства. В таком случае работа с агентством становится наиболее рациональным решением, тем более, если в регионе местные языки преобладают над международными: местные пиарщики будут носителями языка и обладать куда большим пониманием местного рынка СМИ, чем собственные PR-мощности, находящиеся за тысячи километров от него.

Коммуникационное агентство в энергетике – это узкое направление в маркетинге, которое при должном развитии может достичь успеха, особенно в странах, где производство энергии является основным доходом государства, что в свою очередь позволит ещё лучше закрепить стране на мировом рынке.



## Прогноз трансграничного воздействия Белорусской АЭС

*Русецкая М.И.*

Научный руководитель – Кравчук Е.А.

Ежегодный прирост мирового энергопотребления, составляющий 2,1 %, заставляет страны постоянно увеличивать энерго мощности, в том числе и за счёт атомной энергии. Однако этот вид получения энергии вызывает очень много вопросов по поводу безопасности, не только у белорусского населения, но и у стран соседей в связи со строительством АЭС в Островецком районе, однако при соблюдении всех норм при строительстве и эксплуатации все опасения тщетны.

### **Литва**

В период строительства АЭС не произойдёт существенного изменения количественных показателей водного режима р. Вилия и других объектов, т.к. не будет осуществляться забор воды из поверхностных объектов. В период же после ввода в эксплуатацию АЭС будет осуществляться отвод воды из р. Вилия с расходом до 2,54 м<sup>3</sup>/сут. В период эксплуатации АЭС будет осуществляться сброс очищенных хозяйственных сточных вод в р. Вилия в объёме 910,9 м<sup>3</sup>/сут. с их возможным максимальным увеличением до 3600 м<sup>3</sup>/сут.

Прогноз качества воды в р. Вилия до и после ввода в эксплуатацию показал, что на расстоянии до 10,4 км от места сброса происходит практически полное перемешивание с речными водами (на белорусской территории и более чем за 20 км белорусско-литовской границы) с несущественным трансграничным воздействием на качество вод р. Вилии. То же самое касается и подземных вод.

Однако больше всего население волнует вопрос, как собственно белорусская АЭС будет влиять на само это население.

Годовая доза облучения населения, проживающего в г. Вильнюс составляет  $E_{\text{год}} = 0,004$  мкЗв, а это 0,04 % от квоты облучения населения, от выбросов (сбросов) при нормальной эксплуатации АЭС.

### **Польша**

Рассмотрим влияние БелАЭС на территорию Польши на примере г. Варшава.

Годовые дозы облучения населения, проживающего в г. Варшава, составляют  $E_{\text{год}} = 0,0003$  мкЗв – это составляет 0,003 %. Что касается аварийной аварии, то дозы облучения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Доза облучения населения

Расстояние, км	Эффективная доза, мЗв	Доза облучения щитовидной железы, мЗв
100	0,438	6,718
200	0,155	2,375
300	0,084	1,293
400	0,055	0,840
500	0,039	0,601

Что касается водотоков, то у БелАЭС с Польшей нет общих водотоков.

### **Республика Латвия**

Проанализировав облучение населения Латвии на примере её столицы – г. Рига, получаем, что  $E_{\text{год}} = 0,0004$  мкЗв, что в свою очередь составляет 0,004 % квоты облучения населения от выбросов (сбросов) при нормальной эксплуатации АЭС, 10 мкЗв/год.

### **Украина**

$E_{\text{год}} = 0,0002$  мкЗв, что составляет 0,002 % квоты облучения населения от выбросов (сбросов) при нормальной эксплуатации АЭС, 10 мкЗв/год.

Как мы видим воздействие белорусской АЭС при соблюдении всех норм строительства и эксплуатации на соседние страны минимальна. Конечно, никто не застрахован от каких-либо повреждений и других внештатных ситуаций, для этого есть высококвалифицированные специалисты, работа которых – не допустить данные неполадки. Что касается таких стран, как Польша, Украина, РФ и Латвия, то здесь результат мелких утечек и повреждений не будет прослеживаться; в Литве же будет ощущаться небольшое влияние. Однако всё познаётся в сравнении. В такой стране, как Франция, атомная энергетика вырабатывает 72,3 % электроэнергии страны. По состоянию на март 2017 года, Франция имеет 58 действующих промышленных реакторов суммарной мощностью 63,1 ГВт. В Беларуси же строится только два реактора, что не идёт в сравнение с Францией. Более того тип реактора (ВВЭР-1200) считается одним из самых безопасных на данный момент. Из всего выше сказанного делаем вывод, что воздействие белорусской АЭС будет минимально.

### **Литература**

1 Рыков А. Н., Бобров В. В., Стрелков А. И. Обоснование инвестирования в строительство АЭС в Республике Беларусь. Оценка воздействия на окружающую среду – 2010.

2 EnergoBelarus: Воздействие АЭС на окружающую среду [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: [https://energobelarus.by/articles/traditsionnaya\\_energetika/vozdeystvie\\_aes\\_na\\_okruzhayushchuyu\\_sredu/](https://energobelarus.by/articles/traditsionnaya_energetika/vozdeystvie_aes_na_okruzhayushchuyu_sredu/). – Дата доступа: 14.04.2017.

## Схемы собственных нужд электростанций

*Скурчаев А.Ф., Башаркевич Я.В.*

**Научный руководитель – Климкович П.И.**

Для электроснабжения потребителей собственных нужд (СН) электростанций производится отбор мощности на генераторном напряжении. Питание РУ (распределительных устройств) собственных нужд осуществляется от трансформаторов (токоограничивающих реакторов), которые работают раздельно. Раздельная работа трансформаторов позволяет ограничить уровни токов короткого замыкания и уменьшить их влияние на сети, подключаемые к другим секциям. Распределительное устройство СН выполняется с одной секционированной системой сборных шин с одним выключателем на присоединение и, как правило, является комплектным, состоящим из набора шкафов (ячеек) комплектных распределительных устройств (КРУ).

Для питания потребителей СН используются два уровня напряжения: 6 кВ – для питания мощных электродвигателей (более 200 кВт), 0,4 кВ – для остальных потребителей меньшей мощности. Такое разделение связано с тем, что выполнение электродвигателей мощностью менее 200 кВт на напряжение 6 кВ экономически нецелесообразно (они в 1,5–2,3 раза дороже аналогичных, выполненных на напряжение 0,4 кВ), а выполнение электродвигателей мощностью более 200 кВт на напряжение 0,4 кВ влечет за собой увеличение сечения питающих кабелей.

На электрических станциях малой мощности питание СН возможно только на данном напряжении. Резервное питание СН осуществляется также путем отбора мощности от генераторов электростанции, но места подключения присоединений резервного питания СН не должны быть связаны с местами присоединения их рабочего питания. Для особо ответственных потребителей СН предусматриваются дополнительные независимые источники электроэнергии (аккумуляторные батареи, дизель-генераторы, агрегаты бесперебойного питания).

### Литература

1 Рожкова, Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций : Учебник для техникумов / Л.Д. Рожкова, В.С. Козулин. – 3-е изд., перерад. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.

2 Балаков, Ю.Н. Коммутационные узлы энергосистем / Ю.Н. Балаков. – М. : Энергия, 1997. – 183 с.

## **Формирование тарифов на электроэнергию с учетом особенностей белорусской энергетической системы**

*Соленик И.А.*

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Бокун И.А.**

В Беларуси осуществляется государственное регулирование тарифов на электрическую и тепловую энергию, отпускаемую от источников ГПО «Белэнерго»: Министерством антимонопольного регулирования и торговли – для потребителей реального сектора экономики, Советом Министров – для населения. Действующая организационная и методологическая система формирования тарифов на электрическую энергию от источников ГПО «Белэнерго» соответствует существующей вертикально-интегрированной структуре управления электроэнергетической отраслью, когда субъектом хозяйствования осуществляется полный технологический цикл от производства энергии до ее сбыта потребителю. При такой организационной структуре управления электроэнергетической отраслью тарифы формируются и декларируются для конечных потребителей на полезную энергию и включают затраты на производство, передачу, распределение и сбыт энергии.

Электрическая энергия в соответствии с постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 25 ноября 1992 г. № 709 «О единых тарифах на электрическую энергию» отпускается в республике по государственному регулируемым единым по республике тарифам, дифференцированным по группам потребителей.

Электроэнергетика Беларуси, единственная на постсоветском пространстве сохранившая вертикально-интегрированную модель организации, в настоящее время находится в преддверии системных реформ. Долгие годы отсутствие консенсуса относительно концепции реструктуризации энергетического сектора страны, а также удовлетворительные результаты в белорусской электроэнергетике в условиях низких темпов роста спроса на электроэнергию и благоприятной ценовой среды импорта первичных энергоресурсов из Российской Федерации позволяли сохранять статус-кво. При этом государственные региональные монополии были эксклюзивными поставщиками электрической энергии на всей территории страны, а государство осуществляло централизованное регулирование производственно-хозяйственной деятельности энергопредприятий. В настоящее время экономические условия работы энергоотрасли существенно изменились. Это вызвано как значительным ухудшением ценовых условий поставок первичных энергоресурсов (российский природный газ является

основным топливом для белорусской энергосистемы), так и реализацией крупной программы модернизации энергосистемы, основные положения которой утверждены Концепцией энергетической безопасности и Стратегией реализации энергетического потенциала Беларуси. Цена на рынке во многом зависит от его структуры. Для электроэнергетической отрасли это значит, что анализ системы ценообразования на энергоносители, а также разработку рекомендаций по ее совершенствованию следует проводить с учетом текущей отраслевой структуры и перспектив ее изменения. Первоочередная цель реформирования системы ценообразования на энергию должна заключаться в создании отлаженного конкурентного рынка, ориентированного на повышение экономической эффективности и качества энергетических услуг».

По заданию Совета Министров Республики Беларусь РУП «Энергетическая стратегия» был разработан проект Концепции реструктуризации отрасли «Электроэнергетика», конечной целью которой является разделение энергопроизводства по видам деятельности, улучшение инвестиционного климата и создание конкурентной среды, что позволит обеспечить прозрачность финансовых потоков, снизить затраты на генерацию, передачу, распределение и сбыт электроэнергии, сделать электроэнергетику привлекательной для инвесторов с целью реализации программы ее модернизации, увеличит долю высоких технологий и создаст рыночную инфраструктуру для эффективного развития возобновляемых источников энергии и источников распределения генерации электроэнергии. Несмотря на теоретически стройную концепцию, следует принимать во внимание, что процесс реструктуризации электроэнергетики не является одномоментным действием и, следовательно, важно иметь четкое видение того, как будет функционировать энергокомплекс в «переходном» состоянии, когда исходная модель (вертикально-интегрированные энергокомпании) уже ликвидирована, а новая находится в стадии становления.

## Цифровые трансформаторы тока и напряжения

*Сороко В.В.*

Научный руководитель – Сапожникова А.Г.

Высоковольтные цифровые трансформаторы тока (ЦТТ) и напряжения (ЦТН) разработаны в целях:

- повышения точности измерения первичного тока и напряжения в электроустановках с напряжением 110–750 кВ;
- создания взрывобезопасных высоковольтных измерительных систем с улучшенной, более надежной высоковольтной изоляцией;
- выдачи цифровой информации внедряемым на станциях и подстанциях энергосистем цифровым системам измерения, защиты и управления;
- полноценной замены существующих ТТ и ТН, с выводом информации также и в аналоговой форме (1 А, 5 А, 100 В, 100 / 3 В).

Основные преимущества ЦТ:

- взрывобезопасность (даже при внутреннем повреждении высоковольтной изоляции взрыва и пожара не произойдет, в отличие от существующих ТТ 110–750 кВ);
- сухая внутренняя высоковольтная изоляция и вандалоустойчивая внешняя изоляция из силиконовой резины;
- высокий класс точности (лучше, чем 0,2s для систем измерений и АСКУЭ, за счет использования магнитопровода из аморфного магнитного материала);
- передача информации и высоковольтная изоляция между микропроцессорами верхнего и нижнего фланцев по оптоволокну;
- передача без искажений всей информации в режимах короткого замыкания, включая аperiodическую составляющую тока КЗ для систем РЗА с магнитотранзисторного кольца (не происходит насыщения магнитопровода, в отличие от стандартных ТТ);
- кроме стандартных аналоговых выходов 1 А (5 А) с микропроцессоров ЦТТ информация о первичных токах доставляется на щит управления в цифровой форме по оптоволокну;
- встроенная диагностика и тестовый контроль на компьютере метролога (релейщика);
- позиционирование, точное время по системе GPS со встроенным интернетом (как дополнительная опция);
- вес до 85 кг, что в 5–7 раз легче существующих ТТ.

### Литература

1 Нагай, В.И. Высоковольтные оптические преобразователи для систем измерения и анализа качества электрической энергии / В.И. Нагай. – М. : Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.

2 Афанасьев, В.В. Трансформаторы тока и напряжения / В.В. Афанасьев. – М. : Энергопрогресс, 2015. – 275 с.

## Способы заземления нейтрали

*Струнец К.П.*

**Научный руководитель – к.т.н., профессор Силук С.М.**

В настоящее время используются три способа заземления нейтрали в рассматриваемых сетях: изолированная, компенсированная и резистивно-заземленная, начинает применяться и четвертый с резистором и дугогасящим реактором в нейтрали. Установлено, что существует 4 вида заземления нейтрали:

- изолированная;
- глухозаземленная;
- заземленная через дугогасящий реактор;
- заземленная через резистор.

Замыкания на линиях, однофазные и междуфазные, можно подразделить на дуговые и металлические. При дуговых замыканиях соединение токоведущих частей между собой или землей происходит через малое сопротивление дугового канала. Такие замыкания могут возникать вследствие воздействия грозových или внутренних перенапряжений (при сильном загрязнении гирлянд, изоляторов), либо вследствие механических воздействий.

Кратковременные перенапряжения не опасны для нормальной изоляции при рабочих напряжениях до 35 кВ включительно. Однако длительные перенапряжения могут привести к тепловому пробое изоляции. Кроме того, на процесс развития перенапряжений в сетях часто действуют дополнительные факторы, повышающие кратность перенапряжений. Замечено, в частности, что при неустойчивых дугах на неповрежденных фазах часто срабатывают разрядники, имеющие пониженную кратность разрядного напряжения при рабочей частоте. Работа разрядников может привести к появлению перенапряжений, опасных для изоляции. Поэтому каждый раз, когда происходит срабатывание разрядников, на изоляцию здоровых фаз воздействует перенапряжение.

При компенсации емкостных токов воздушные и кабельные сети могут длительно работать с замкнувшейся на землю фазой. В сети с изолированной нейтралью трансформаторов однофазное замыкание может существовать, если емкостной ток замыкания препятствует самопогасанию дуги в месте замыкания.

При резистивном заземлении нейтрали ограничение перенапряжений при дуговых замыканиях осуществляется за счет разряда емкости здоровых фаз и снижения напряжения на нейтрали до значений, исключающих последующие пробой ослабленной изоляции аварийной фазы. Кроме того,



практически исключаются опасные феррорезонансные явления, что в свою очередь так же приводит к повышению надежности рассматриваемых сетей.

#### **Литература**

1 Маньков, В.Д. Основы проектирования систем электроснабжения : Справочное пособие / В.Д. Маньков. – СПб. : ЭлектроСервис, 2010. – 664 с.

2 Методические указания по заземлению сетей 6–35 кВ Белорусской энергосистемы через резистор : СТП 09110.20.187-09.; введ. 01.03.10. – Минск : НИПИ РУП «Белэнергосетьпроект», 2009. – 182 с.

## **Защиты от однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6–35 кВ с различными режимами заземления нейтрали**

*Турук К.А.*

**Научный руководитель – к.т.н. Булойчик Е.В.**

Однофазное замыкание на землю является наиболее частым видом повреждения в трехфазных электрических сетях всех классов напряжения.

В электрических сетях 6–35 кВ, работающих, как правило, с изолированной или компенсированной нейтралью, значения токов однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) невелики, они не превышают 20–30 А. Поэтому сети этих классов напряжения традиционно называют сетями с малым током замыкания на землю.

Однако ОЗЗ представляют большую опасность для оборудования электрических сетей и для находящихся вблизи места ОЗЗ людей и животных. В связи с этим Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей требуют в одних случаях быстро автоматически отключать ОЗЗ, а в других требуют немедленно приступить к определению присоединения с ОЗЗ и затем отключать его.

Создать селективную и высокочувствительную защиту от ОЗЗ, пригодную для любых видов сетей с малым током замыкания на землю, до настоящего времени не удалось никому. Действительно, трудно создать универсальную защиту от ОЗЗ для таких разных типов электроустановок, как воздушные и кабельные линии, генераторы и электродвигатели, для таких разных режимов заземления нейтральных точек сети, как «изолированная нейтраль», «резонансно-заземленная нейтраль» или «резистивно-заземленная нейтраль» (нейтраль, заземленная через ограничивающее активное сопротивление – резистор).

Особые трудности при выполнении селективных защит от ОЗЗ возникают в сетях 6–10 кВ с резонансно-заземленной нейтралью, где ток повреждения промышленной частоты полностью компенсируется током дугогашащего реактора (ДГР) и поэтому не может быть использован в качестве источника информации для защиты. Дополнительные трудности возникают при необходимости селективного определения присоединения с ОЗЗ в электрических сетях сложной конфигурации, при отсутствии на присоединении кабельной вставки, необходимой для установки трансформатора тока нулевой последовательности, при часто меняющейся первичной схеме защищаемой сети и в других случаях.

В работе рассматриваются основные принципы и типы защит от ОЗЗ, которые практически используются в течение многих лет в электрических

сетях 6–35 кВ. Даются рекомендации по их применению в зависимости от вида электрической сети, режима заземления нейтрали, количества и типа трансформаторов тока и напряжения, от требований, предъявляемых к защите. Рассматриваются виды режимов заземления нейтрали в этих сетях.

#### **Литература**

1 Евдокунин, Г.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ / Г.А. Евдокунин и др. // Новости электротехники. – 2003. – № 5. – С. 5–13.

2 Сирота, И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. – Киев : Наукова Думка, 1985. – 264 с.

3 Шабад, М.А. Обзор режимов заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ России / М.А. Шабад // Энергетик. – 1999. – № 3. – С. 12–17.

4 Евдокунин, Г.А. О принципах построения релейной защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ / Г.А. Евдокунин // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования : материалы международной научно-технической конференции (г. Будапешт, 14–18 ноября 2005 г.) / ПЭИПК. – СПб., 2006. – С. 33–35.

## Состояние радиационной безопасности на АЭС

*Файлер Р.В.*

Научный руководитель – к.т.н., профессор Силук С.М.

При использовании атомной энергии, как и при использовании любого другого вида энергии, должен быть поставлен надежный заслон самой возможности отрицательного воздействия на человека новой техники и технологии. Применительно к атомной энергии – это комплекс мероприятий, предотвращающий вредное воздействие ионизирующих излучений на человека и объекты окружающей среды. Таким заслоном в атомной технике является система радиационной безопасности.

Радиационная безопасность является одним из разделов техники безопасности. Из перечисленных задач следует, что для их решения необходимы компетенция и усилия специалистов различных отраслей знаний – радиобиологов, физиков, математиков, инженеров и гигиенистов.

Безусловно, что АЭС, как и любая электростанция другого типа, оказывают определенное влияние на окружающую среду. Однако в действии атомных станций нет ничего специфического, характерного только для них.

В настоящее время концепция беспорогового действия радиации является официальной доктриной, на базе которой ведется нормирование, оцениваются возможные неблагоприятные последствия при развитии тех или иных направлений атомной техники и на этой основе принимаются рекомендации по радиационной защите.

Помимо технических мер, направленных на повышение уровня безопасности АЭС, нужна постоянная информация о работе ядерных реактивов, остановках блоков, их причинах. В регионах, где намечается строительство АЭС, необходимо проводить широкое общественное обсуждение, т. к. атомная энергетика не может развиваться без поддержки со стороны населения. Обсуждение проблем ядерной энергетике и участие населения в этом процессе требуют определенных знаний о социальных, экологических, экономических аспектах энергетике.

### Литература

1 Гродненский областной центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа : [http://gigiena.inbel.biz/state/AC:DS\\_SELECTED\\_ID..DS\\_START\\_INDEX.295/1781339987](http://gigiena.inbel.biz/state/AC:DS_SELECTED_ID..DS_START_INDEX.295/1781339987). – Дата доступа : 12.12.2016.

2 Госатомнадзор [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа : [http://www.gosatomnadzor.gov.by/phocadownload/dokladi\\_i\\_obzori/The\\_review\\_of\\_a\\_status\\_of\\_NRS\\_in\\_Belarus\\_2015\\_ru.pdf](http://www.gosatomnadzor.gov.by/phocadownload/dokladi_i_obzori/The_review_of_a_status_of_NRS_in_Belarus_2015_ru.pdf). – Дата доступа : 12.12.2016.

## Типы аккумуляторных батарей

*Федорович В.Л.*

**Научный руководитель – Сапожникова А.Г.**

Свинцово-кислотный аккумулятор – это вторичный химический источник тока, в основе работы которого лежит работа двух электродов различной природы (свинца и диоксида свинца), ионная проводимость между которым обеспечивается жидким или твердым электролитом.

Свинцово-кислотные аккумуляторы являются одним из наиболее распространенных типов, среди прочих электрохимических систем. А стоимость энергии (Ватт/час), наиболее выгодной по затратам. Но наряду с относительной низкой стоимостью запасаемой энергии, системы данного типа, имеют существенный недостаток – существует необходимость участия человека в его обслуживании.

На смену свинцово-кислотным аккумуляторам с жидким электролитом, пришли герметичные аккумуляторы с твердым электролитом, которые, в сущности, устранили необходимость участия человека в обслуживании. Строго говоря, полная герметизация не может быть достигнута, т. к. невозможно обеспечить полную рекомбинацию кислорода и водорода. Поэтому данный тип корректней называть – герметизированные аккумуляторы.

Отличительной особенностью аккумуляторов с жидким электролитом являются:

– Необходимость в отдельном вентилируемом помещении (аккумуляторной комнате).

– Длительный срок службы от 15 до 25 лет, благодаря возможности доливания электролита.

В зависимости от технологии производства пластин подразделяются на разные типы:

– OGi «Ortfeste Gitterplatten» , что в переводе на русский язык означает «стационарные аккумуляторы с намазными пластинами». Идеально подходят для кратковременных разрядов большими токами. Область применения (объекты энергетики): ГРЭС, АЭС, ТЭЦ, ТЭС, высоковольтные подстанции, нефтегазовый комплекс, металлургические и химические комбинаты.

– GroE Срок службы аккумуляторов GroE – самый продолжительный из всех – 25 лет. Особенностью конструкции данного аккумулятора является использование положительной пластины большой поверхности, имеющей площадь в 10 раз больше обычной пластины и изготовленной из

химически чистого свинца (99,99 %). Области применения: объекты производства и распределения энергии, аварийное энергоснабжение.

– OPzS – с трубчатыми положительными и плоскими намазными отрицательными пластинами; срок службы от 15 до 20 лет, очень высокая механическая прочность пластин, наибольший из всех типов аккумуляторов циклический ресурс (1500–1800 циклов заряд и разряд при глубине разряда 80 %), применяется в основном для режимов разряда средней и большой продолжительности, можно в сочетании с умеренными толчковыми токами; малообслуживаемые (долив воды один раз в 1–2 года).

Герметизированные необслуживаемые аккумуляторные батареи.

Аккумуляторы этой группы часто обозначают сокращенно VRLA (Valve Regulated Lead Acid , в переводе с англ. Клапанно-Регулируемые Свинцово-Кислотные) или же SLA (Sealed Lead Acid Герметизированные Свинцово-Кислотные).

Аккумуляторы AGM (Absorbent Glass Mat) — это технология изготовления свинцово-кислотных аккумуляторов. Отличие батарей AGM от классических в том, что в них электролит абсорбирован в пористое стекловолокно. Такое решение позволяет исключить вытекание электролита, увеличить рекомбинацию паров обратно в жидкость и следственно герметизировать аккумулятор, но при этом не теряются преимущества классической батареи – ведь электролит все тот же – жидкий.

Преимущества AGM:

- Высокий толчковый ток, высокий ток заряда/разряда.
- Конструкция не требующая обслуживания.
- Конструкция герметична и имеет клапанную регулировку, предотвращает утечку кислоты и коррозию клемм.
- Более безопасная работа: при правильной зарядке батарей исключается возможность выделения газов и опасность взрыва.
- Уверенная работа при низких температурах в зависимости от технологии до – 30 °С (ниже возможна кристаллизация электролита разряженной батареи и как следствие снижение срока службы ввиду повреждения активной поверхности).

Основное применение аккумуляторов AGM технологии в системах большой емкости от 30 до 200 А·ч.

GEL (гелевые аккумуляторы) (электролит – гелеобразный) – подвид свинцово-кислотных необслуживаемых герметичных аккумуляторов, в которых иммобилизация электролита на пластинах достигается путем добавления к серной кислоте силиконового наполнителя.

Особенности гелевых аккумуляторов:

– Рекомбинация газов в гелевых аккумуляторах имеет несколько меньшую эффективность (до 97 %), чем в AGM типе (в которых она свыше 99 %).

– В гелевом электролите ионы имеют худшие показатели подвижности (в силу большей плотности геля), что отрицательно сказывается на динамических разрядных и зарядных характеристиках гелевых аккумуляторов (развиваемые толчковые токи на 20–40 % ниже, чем у AGM). Более того, может наблюдаться временный провал в напряжении при набросе нагрузки, что может приводить к срабатыванию автоматики и защит и неадекватному поведению оборудования в целом; поэтому следует с осторожностью применять гелевые аккумуляторы в системах управления током и т. п. устройствах с коммутацией быстроизменяющихся токов.

– Гель эффективнее фиксирует материал пластин, снижая их износ в режимах глубоких разрядов, поэтому циклический ресурс гелевых аккумуляторов в 2–3 раза выше, чем у обычных AGM; это главное (и, пожалуй, практически единственное) преимущество гелевых аккумуляторов, поэтому их целесообразно применять в тех случаях, где такое применение (циклический режим с глубоким разрядом) востребовано.

#### **Литература**

1 Аберсон, М.Л. Источники оперативного тока на станциях и подстанциях / М.Л. Амберсон. – М. : Энергия, 1964. – 48 с.

2 Гук, Ю.Б. Проектирование электрической части станций и подстанций : учеб. пособие для вузов / Ю.Б. Гук, В.В. Кантан, С.С. Петрова. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 312 с.

## **Расчет максимальных тяжений гибких шин 110–220 кВ при коротких замыканиях**

*Федосевич Э.А., Масюк С.С.*

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.**

Оценка электродинамической стойкости расщепленных проводов воздушных линий заключается в проверке их схлестывания и механической прочности. Для проверки схлестывания нужно выявить наибольший размах колебаний при коротких замыканиях (КЗ). Небольшие (на порядок меньше междуфазных) расстояния между проводами расщепленной фазы обуславливают большие электродинамические усилия, действующие внутри расщепленной фазы при КЗ. Испытания в опытных пролетах показали, что при определенном сочетании конструктивных параметров расщепленной фазы и величины токов КЗ возникает схлестывание проводов. После схлестывания провода фазы двигаются под действием междуфазных электродинамических усилий (ЭДУ). В момент максимального стягивания проводов в пучке под действием внутрифазных ЭДУ происходит резкое увеличение тяжения фаз.

Под электродинамической стойкостью гибких проводов электроустановок понимают их способность противостоять электродинамическому действию токов КЗ до и после автоматического отключения цепи КЗ без повреждений. ПУЭ указывает на ток КЗ в 20 кА, по достижении которого необходимо производить расчет гибких шин на электродинамическую стойкость. С возрастанием токов КЗ их электродинамическое действие становится ключевым фактором, определяющим габариты и механические характеристики токоведущих конструкций с гибкими проводами при проектировании.

Анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований позволяет составить подробную картину поведения гибких проводов при КЗ. В траекториях движения проводов выделяют два участка. На первом проводе движутся с ускорением под действием электродинамических усилий (ЭДУ). Началом второго участка является положение провода в момент отключения КЗ. После отключения движение провода определяется сочетанием действия инерционных и упругих сил и тяжения провода. Из-за влияния температурных удлинений проводов, податливости опор, а также изменения формы проводов и гирлянд изоляторов траектории движения гибких проводников приобретают более сложную форму.

### **Литература**

1 Сергей, И.И. Упрощенный расчет максимальных тяжений проводов на двух стадиях их движения при коротком замыкании / И.И. Сергей, А.П. Андрукевич,



Е.Г. Пономаренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 6. – С. 12–26.

2 Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций : учеб. пособие для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

## **Реализация цифрового фильтра для выделения основной гармоник на основе дискретного преобразования Фурье**

*Хомяков Э.А., Жиркова К.Ю.*

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Румянцев В.Ю.**

Анализ Фурье закладывает основы многих методов, применяющихся в области цифровой обработки сигналов (ЦОС). По сути дела, преобразование Фурье (фактически существует несколько вариантов таких преобразований) позволяет сопоставить сигналу, заданному во временной области, его эквивалентное представление в частотной области. Наоборот, если известна частотная характеристика сигнала, то обратное преобразование Фурье позволяет определить соответствующий сигнал во временной области.

В дополнение к частотному анализу, эти преобразования полезны при проектировании фильтров. Частотная характеристика фильтра может быть получена посредством преобразования Фурье его импульсной реакции. И наоборот, если определена частотная характеристика сигнала, то требуемая импульсная реакция может быть получена с помощью обратного преобразования Фурье над его частотной характеристикой. Цифровые фильтры могут быть созданы на основе их импульсной реакции, поскольку коэффициенты фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ) идентичны дискретной импульсной реакции фильтра.

Семейство преобразований Фурье представляет собой преобразование Фурье, ряды Фурье, дискретные ряды Фурье и дискретное преобразование Фурье. С течением времени принятые определения получили развитие (не обязательно вполне логичное) в зависимости от того, является ли сигнал непрерывно-апериодическим, непрерывно-периодическим, дискретно-апериодическим или дискретно-периодическим.

Единственный член этого семейства, который имеет отношение к цифровой обработке сигналов, – это дискретное преобразование Фурье (ДПФ), которое оперирует дискретной по времени выборкой периодического сигнала во временной области. Для того, чтобы быть представленным в виде суммы синусоид, сигнал должен быть периодическим.

Существует два основных типа ДПФ: вещественное ДПФ и комплексное ДПФ. Так как входные отсчеты во временной области являются вещественными и не имеют мнимой части, мнимая часть входных отсчетов всегда принимается равной нулю. Выход ДПФ содержит вещественную и мнимую компоненты, которые могут быть преобразованы в амплитуду и

фазу. Вещественное ДПФ выглядит несколько проще и, в основном, является упрощением комплексного ДПФ.

Большинство алгоритмов вычисления быстрого преобразования Фурье (БПФ) составлено с использованием формата комплексного ДПФ, поэтому важно понимать, как работает комплексное ДПФ и как оно соотносится с вещественным ДПФ. В частности, если известны выходные частоты вещественного ДПФ и требуется использовать обратное комплексное ДПФ для вычисления отсчетов во временной области, надо знать, как разместить выходные точки вещественного ДПФ в формате комплексного ДПФ перед выполнением обратного комплексного ДПФ.

Комплексное ДПФ имеет вещественные и мнимые значения и на входе, и на выходе. Практически, мнимые части отсчетов во временной области устанавливаются в ноль. При рассмотрении спектра, получаемого в результате вычисления комплексного ДПФ, полезно знать, как связать его с результатом вычисления вещественного ДПФ и наоборот. Заштрихованные области в диаграмме соответствуют точкам, которые являются общими и для вещественного, и для комплексного ДПФ.

На основе вещественных компонентов ДПФ могут быть сгенерированы отрицательные частотные компоненты комплексного БПФ. У большинства алгоритмов БПФ есть особенность: они способны работать лишь тогда, когда длина анализируемого сигнала является степенью двойки. Обычно это не представляет большой проблемы, так как анализируемый сигнал всегда можно дополнить нулями до необходимого размера.

Преобразования Фурье полезны при проектировании фильтров. Частотная характеристика фильтра может быть получена посредством преобразования Фурье его импульсной реакции. И наоборот, если определена частотная характеристика сигнала, то требуемая импульсная реакция может быть получена с помощью обратного преобразования Фурье над его частотной характеристикой. Цифровые фильтры могут быть созданы на основе их импульсной реакции, поскольку коэффициенты фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ) идентичны дискретной импульсной реакции фильтра.

#### **Литература**

1 Умняшкин, С.В. Теоретические основы цифровой обработки и представления сигналов / С.В. Умняшкин. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 249 с.

2 Матюшкин, Б.Д. Цифровые фильтры / Б.Д. Матюшкин. – СПб. : НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2012. – 98 с.

## **Строительство энергоэффективного жилья в Республике Беларусь**

*Цвирко А.С.*

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Манцерова Т.Ф.**

В перспективе в Республике Беларусь предполагается возведение жилья в энергоэффективном режиме. В настоящее время известны следующие технические решения, обеспечивающие снижение потребления тепловой энергии при эксплуатации зданий:

- снижение потерь тепла;
- снижение затрат тепловой энергии.

При строительстве энергоэффективного жилья экономия электроэнергии может быть достигнута за счет использования солнечных панелей (баттарей); экономия тепла – за счет теплоизоляции (каменная вата, термошубы и т. д.) и тепловых насосов (грунтовый тепловой насос скважинного типа, грунтовый тепловой насос горизонтального типа, тепловой насос воздушного типа, тепловой насос водного типа). Одним из направлений совершенствования энергосберегающей политики в строительстве является использование солнечных и вакуумных коллекторов.

### **Литература**

1 Углубленный обзор политики и программ в сфере энергоэффективности: Республика Беларусь. Секретариат энергетической хартии 2013 г. – URL: [www.encharter.org](http://www.encharter.org).

## Синхронные компенсаторы

*Чемерко П.П.*

**Научный руководитель – Потачиц Я.В.**

Синхронный компенсатор представляет собой синхронный двигатель, работающий без нагрузки на валу; при этом по обмотке якоря проходит практически только реактивный ток. Синхронный компенсатор может работать в режиме улучшения  $\cos \varphi$  или в режиме стабилизации напряжения.

Основные потребители электрической энергии, кроме активной мощности, потребляют от генераторов системы реактивную мощность. К числу потребителей, требующих большие намагничивающие реактивные токи для создания и поддержания магнитного потока, относятся асинхронные двигатели, трансформаторы, индукционные печи и другие. В связи с этим распределительные сети обычно работают с отстающим током.

Реактивная мощность, вырабатываемая генератором, получается с наименьшими затратами. Однако передача реактивной мощности от генераторов связана с дополнительными потерями в трансформаторах и линиях передач. Поэтому для получения реактивной мощности становится экономически выгодным применение синхронных компенсаторов, располагаемых на узловых подстанциях системы или непосредственно у потребителей.

Синхронные двигатели благодаря возбуждению постоянным током они могут работать с  $\cos \varphi = 1$  и не потребляют при этом реактивной мощности из сети, а при работе, с перевозбуждением отдают реактивную мощность в сеть. В результате улучшается коэффициент мощности сети и уменьшаются падение напряжения и потери в ней, а также повышается коэффициент мощности генераторов, работающих на электростанциях.

Синхронные компенсаторы предназначаются для компенсации коэффициента мощности сети и поддержания нормального уровня напряжения сети в районах сосредоточения потребительских нагрузок.

Синхронным компенсатор – синхронная машина, работающая в двигательном режиме без нагрузки на валу при изменяющемся токе возбуждения.

### Литература

1 Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций : учеб. пособие для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

2 Рожкова, Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций : Учебник для техникумов / Л.Д. Рожкова, В.С. Козулин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.

## С о д е р ж а н и е

Оценка электродинамической стойкости токоведущих частей комплектных распределительных устройств с учетом упругой податливости надставок сборных шин

Алехнович А.С., Баран А.Г.

Использование солнечно-водородной энергии на приусадебном участке

Апетенок В.О.

Определение тока электродинамической стойкости гибкой ошиновки шинных пролетов типовых конструкций распределительных устройств 110 кВ с одним проводом в фазе АС-500/27

Баран А.Г.

Выбор расчетной схемы для оценки электродинамической стойкости шинной конструкции комплектных распределительных устройств

Баран А.Г., Алехнович А.С.

Определение токов электродинамической стойкости пролетов распределительных устройств 110 кВ с одним проводом в фазе АС-185/29

Баран А.Г., Баран Ю.Г.

Беспроводные системы контроля температуры критически важного электрооборудования на основе ПАВ технологий

Баран А.Г., Баран Ю.Г.

Моделирование коммутационных перенапряжений в среде Simulink MatLab

Баранов В.Б.

Математическое моделирование измерительных трансформаторов тока и их вторичных цепей

Башаркевич Я.В.

Регулирование уровней токов короткого замыкания в электроэнергетических системах

Башаркевич Я.В., Зарихта К.С., Русецкий К.И.

Моделирование броска тока намагничивания силовых трансформаторов в среде Simulink MatLab

Бойков А.Д.

Расчет токов короткого замыкания при помощи программы TKZdo1kV

Бурло В.В., Зарихта К.С.

Выбор электрических кабелей

Бухтик Е.П.

- Инвертор с амплитудно-импульсной модуляцией выходного напряжения  
Валов Ю.Г.
- Программа для расчета токов короткого замыкания ТК315  
Вишеватый А.Д., Русецкий К.И., Зарихта К.С.
- Современные датчики тока  
Власюк И.А.
- Миниатюризация и повышение надёжности электротехнических устройств  
Дайнеко А.В.
- Энергогенерация на биотопливе  
Данильчук В.В., Пусь А.В.
- Эффективное использование ветроэнергетики в Республике Беларусь  
Девялтовская Л.А., Мачульская В.Д.
- Нелинейные ограничители перенапряжений  
Дударев А.В.
- Автоматическое гашение поля генераторов и компенсаторов  
Елисеев В.С., Волов Р.А.
- Проблемы энергетической безопасности Республики Беларусь  
и пути их решения  
Елисева А.И., Шумский А.Н.
- Определение потерь мощности в поддерживающих конструкциях токопроводов  
мощных генераторов  
Емельянов А.В.
- Дискретные системы управления  
Жиркова К.Ю.
- Применение Z-преобразования в системах управления  
Жиркова К.Ю.
- Решение вопроса регулирования уровней токов короткого замыкания  
Зарихта К.С., Позняк Д.О., Русецкий К.И.
- Моделирование переходного процесса при коротком замыкании  
в среде Simulink MatLab  
Изоитко О.Л.
- Подводные кабельные линии  
Исмоилов Н.А.
- Пути проникновения помех в микропроцессорные устройства  
Калитуха А.А.
- Вращающиеся трансформаторы и их применение  
Китаев А.С.

- Средства компьютерного моделирования  
Климкович И.П.
- Компьютерное моделирование как метод исследований реальных объектов  
Кожемяко А.Г., Башаркевич Я.В., Кривonos Ю.И., Климкович И.П.
- Экономическая оценка возобновляемых источников энергии  
Лапшина Т.С.
- Высоковольтные генераторные элегазовые комплексы  
Лашук М.С.
- Дуговая защита  
Лобачев В.В.
- Повышение электродинамической стойкости гибких проводников  
Ложечников И.И.
- Перспективы развития возобновляемых источников энергии  
в Республике Казахстан  
Мажитова Х.
- Преобразование солнечной энергии в электрическую энергию переменного тока  
Макеев А.А.
- Методы расчета электродинамической стойкости гибких токоведущих  
конструкций  
Максимова М.С.
- Электродинамическая стойкость гибких шин распределительных устройств  
электростанций  
Манцевич А.В.
- Выбор способа обеспечения энергией частного дома в Республике Беларусь  
Марков А.Н., Дудченко Г.А.
- Расчет максимальных тяжений гибких шин 110 кВ при коротких замыканиях  
Мартиняйтис А.Э.
- Малое предпринимательство в энергетике Республики Беларусь  
Матвейчук Д.Н., Михно Н.Ю.
- Экранирование контрольных кабелей связи  
Муха В.О.
- Применение цифровых программно-аппаратных комплексов RTDS  
Мшар Д.И., Рабушко П.С.
- Газопоршневые установки  
Николаенко Д.В.
- Типы и принципы работы стабилизаторов переменного сетевого напряжения  
Павлюкевич Е.Н., Шаповалова И.А.



- Влияние тепловых электрических станций на окружающую среду  
Панас Н.М., Ковалевич П.В.
- Газотурбинные установки  
Петрашко В.Ю.
- Особенности моделирования в реальном времени  
Плюшев Б.В., Рабушко П.С.
- Роль энергетической безопасности и энергоэффективности как необходимого и достаточного условия устойчивого развития  
Полухович А.Д., Озерец Ю.В.
- RTDS – цифровые моделирующие комплексы реального времени  
Рабушко П.С.
- Цифровое моделирование в реальном времени  
Рабушко П.С.
- Показатели качества электроэнергии  
Рожко А.С.
- Программы, применяемые для визуализации языков программирования  
Румянцев В.О., Мшар Д.И.
- PR и коммуникационное агентство в энергетике  
Русецкая М.И.
- Прогноз трансграничного воздействия Белорусской АЭС  
Русецкая М.И.
- Схемы собственных нужд электростанций  
Скурчаев А.Ф., Башаркевич Я.В.
- Формирование тарифов на электроэнергию с учетом особенностей белорусской энергетической системы  
Соленик И.А.
- Цифровые трансформаторы тока и напряжения  
Сороко В.В.
- Способы заземления нейтрали  
Струнец К.П.
- Защиты от однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6–35 кВ с различными режимами заземления нейтрали  
Турук К.А.
- Состояние радиационной безопасности на АЭС  
Файлер Р.В.
- Типы аккумуляторных батарей  
Федорович В.Л.

Расчет максимальных тяжений гибких шин 110–220 кВ при коротких замыканиях  
Федосевич Э.А., Масюк С.С.

Реализация цифрового фильтра для выделения основной гармоники  
на основе дискретного преобразования Фурье  
Хомяков Э.А., Жиркова К.Ю.

Строительство энергоэффективного жилья в Республике Беларусь  
Цвирко А.С.

Синхронные компенсаторы  
Чемерко П.П.