

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Энергетический факультет

ЭНЕРГЕТИКА БЕЛАРУСИ-2020

Сборник научных работ
Республиканской научно-практической конференции
профессорско-преподавательского состава, научных работников,
докторантов и аспирантов ЭФ БНТУ (проводится в рамках
72-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского
состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ)

10 ноября 2020 г.

Минск
БНТУ
2021

УДК 620.9(476)(063)
ББК 31я43
Э65

Редакционная коллегия:
Е.Г. Пономаренко, Н.В. Шведко

Ответственный секретарь:
Н.В. Шведко

В настоящий сборник включены материалы докладов Республиканской научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов ЭФ БНТУ (проводится в рамках 72-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ) «Энергетика Беларуси-2020», участники которой выступали по следующим направлениям: «Электрические станции», «Электроснабжение», «Электрические системы», «Электротехника и электроника».

Требования к системе: IBM PC-совместимый ПК стандартной конфигурации, дисковод CD-ROM. Программа работает в среде Windows.

Открытие электронного издания проводится посредством запуска файла ЭФ_нояб_2020. Возможен просмотр электронного издания непосредственно с компакт-диска без предварительного копирования на жесткий диск компьютера.

Дата доступа в сети: 20.04.2021. Объем издания: 2 Мб. Заказ 160

Белорусский национальный технический университет

Пр.-т. Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь

Тел (017) 292-40-81, факс (017) 292-91-3

ISBN 978-985-583-624-8

© Белорусский национальный
технический университет, 2021

ОРГКОМИТЕТ

П р е с е д а т е л ь:

член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси,
д.т.н., профессор *Ф.А. Романюк*,

З а м. п р е с е д а т е л я:

декан энергетического факультета, к.т.н.,
доцент *Е.Г. Пономаренко*

Ч л е н ы о р г к о м и т е т а:

заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции»,
д.т.н., профессор *Н.Б. Карницкий*;

заведующий кафедрой «Электрические системы»,
д.т.н., профессор *М.И. Фурсанов*;

заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»,
д.т.н., профессор *В.А. Седнин*;

зав. отделением энергетики НИПИ к.т.н., профессор *Ю.В. Румянцев*;

заведующий кафедрой «Электротехника и электроника»,
к.т.н., доцент *Ю.В. Бладыко*;

заместитель декана энергетического факультета,
к.т.н. *Е.А. Дерюгина*;

заведующий кафедрой «Электроснабжение»,
к.т.н., доцент *В.Б. Козловская*;

заведующий кафедрой «Экономика и организация энергетики»,
к.т.н., доцент *Т.Ф. Манцерова*;

заведующий кафедрой «Электрические станции»,
к.т.н., доцент *И.В. Новаш*

Содержание

Подсекция «Электроснабжение»

Обеспечение оптимальных режимов работы линий наружного освещения.	7
Козловская В.Б., Калечиц В.Н.	
Мобильные электроэнергетические решения КТП 10/0,4 кВ	9
Казак Д.А.	
К вопросу обеспечения надежности работы миниэнергокомплексов на основе асинхронного генератора в автономном режиме	10
Константинова С.В., Ярошевич Т.М., Капустинский А.Ю	
Классификация систем автоматического управления освещением	13
Джугля М.Н.	
Особенности транспортировки КТП 10/0,4 кВ максимальной заводской готовности железнодорожным транспортом	15
Казак Д.А.	
Об одном способе гашения колебаний башни ВЭУ	17
Горностаи А.В.	
Особенности выбора автономных осветительных установок для наружного освещения ..	21
Калечиц В.Н.	
Регулирование напряжения в линиях 6/10 кВ нефтегазовых предприятий.....	20
Казак Д.А.	
Об одном способе гашения колебаний лопасти ВЭУ.....	22
Горностаи А.В.	
Каскадирование автоматических выключателей.....	23
Капустинский А.Ю.	
Влияние гармоник на системы электроснабжения.....	24
Колосова И.В.	
Оценка работы газоразрядных ламп на повышенной частоте	26
Смоловская Д.М.	
Анализ режимов работы миниэнергокомплексов	29
Ярошевич Т.М.	
Тенденции в использовании электродвигателей в горнодобывающей отрасли.....	31
Протасеня М.Л.	
Определение межкалибровочного интервала измерительных каналов автоматизированных систем учета электрической энергии	33
Анищенко В.А., Писарук Т.В.	

Подсекция «Электрические системы» 36

Интерактивные модули в режиме онлайн по дисциплине «КИРЭС».....	36
Гецман Е.М.	
Оптимизация распределительных сетей в условиях применения распределительной генерации	39
Грайцевич Е.Г., Гецман Е.М.	
Автоматизация расчета технических характеристик силовых электрических кабелей.....	41
Короткевич М.А., Дашковский А.А.	
Адаптивная синхронизация генерирующего источника с энергосистемой	42
Новиков С.О., Новикова Л.И., Титко В.Ю.	
Моделирование работы терминала делительной автоматики мини-ТЭЦ	46
Петрашевич Н.С.	
Применение малых источников генерации в составе энергосистемы.....	48

Попкова Н.А., Секацкий Д.А. Трансформаторы с переключением ответвлений без возбуждения и трансформаторы с устройством регулирования под нагрузкой	50
Романович Д.Г. Определение оптимальных значений коэффициента полезного действия электропередачи	52
Старжинский А.Л. Определение участка однофазного повреждения на вл (влп)-10 кв без замыкания на «землю»	55
Фарино А.А. О необходимости создания системы энергетического менеджмента в Белорусском национальном техническом университете	57
Ханевская В.А. Выбор жестких шин распределительных устройств	59
Гапанюк С. Г., Лугачёв В. М. Расчета укрупненных показателей строительства кабельных линий напряжением 0,4–10 кВ	62
Гапанюк С. Г. Статические характеристики нагрузки по напряжению понижающих подстанций с учетом действия автоматических регуляторов напряжения	64
Волков А.А. Подсекция «Электротехника и электроника»	 67
Векторно-параметрический метод расчета статики гибких проводов воздушных линий .	67
Бладыко Ю.В. Механический расчета гибких токопроводов с горизонтальными сосредоточенными нагрузками	70
Бладыко Ю.В. Оптимизация с уточного режима энергосистемы в период ремонтной кампании	74
Александров О.И., Жуковская Т.Е. Минимизация погрешностей, возникающих при гармоническом анализе диагностических сигналов конечной длительности	77
Зеленко В.В., Суходолов Ю.В., Шейников А.А. Обнаружение дефектов обмоток асинхронных электродвигателей путем анализа частотных характеристик	79
Зеленко В.В., Исаев А.В., Суходолов Ю.В. Моделирование схем управления электродвигателями различных типов в PROTEUS	81
Матвеев И.П. Интенсификация энергосбережения – ключевой вопрос развития экономики	83
Мороз Р.Р. К вопросу об энергоэффективности ветроэнергетических установок для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей	85
Михальцевич Г.А. Методические рекомендации по оцениванию погрешностей и неопределенностей результатов измерений активной мощности переменного тока в трехфазных цепях методом «трех ваттметров»	88
Савкова Е.Н., Сипачев И.В., Малашонок С.В. Классификация электрических генераторов возвратно-поступательного движения	93
Менжинский А.Б., к.т.н., доцент Малашин А.Н. Разработка способа определения индуктивных параметров электрической машины с многофазной дробной зубцовой обмоткой	95

Пантелеев С.В., Малашин А.Н., Степанов А.А. Разработка способа векторного управления полупроводниковым преобразователем, обеспечивающего полигармонический режим работы многофазной электрической машины	98
Пантелеев С.В., Малашин А.Н., Сизиков С.В. Адаптивная система фазовой синхронизации активного силового фильтра на основе нейросетевых технологий.....	101
Первенёнок Р.Е., Сицко А.Л., Каледа А.Е. Капитальные затраты на сооружение кабельных линий электропередачи	103
Короткевич М.А., Подгайский С.И. Подсекция «Электрические станции»	106
Компьютерный испытательный комплекс для исследования функциональных свойств цифровых защит асинхронного двигателя.....	106
Новаш И.В., Румянцев В.Ю., Дерюгина Е.А. 3D-моделирование в задачах электротехники	109
Новаш И.В., Мешкова А.Н., Арутюнов М.А., Гаврилов Д.А., Хитев Н.Р., Рябцев И.А., Климкович П.И. Определение токов электродинамической стойкости для гибких проводников ВЛ и ОРУ.....	112
Пономаренко Е.Г., Климкович П.И., Баран А.Г. Способы повышения электродинамической стойкости гибкой ошиновки электроустановок.....	114
Пономаренко Е.Г., Баран А.Г., Васильева А.А. Настройка корректора турбинного регулятора мощности	117
Артёменко К.И. Модификация алгоритма расчета динамических нагрузок на конструктивные элементы электроустановок.....	119
Потачиц Я.В. Анализ электродинамической стойкости основных конструктивных элементов распределительных устройств с гибкой ошиновкой.....	120
Потачиц Я.В. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты в условиях изменения частоты	121
Романюк Ф.А., Румянцев В.Ю., Румянцев Ю.В., Дерюгина Е.А. Планирование учебного процесса первой ступени высшего образования заочной формы обучения со сроком 5 лет.....	124
Булат В.А. Направления развития средств определения мест повреждения на линиях электропередачи 6–750 кВ	126
Шевалдин М. А. Повышение технического совершенства защит линий электропередачи 6–10 кВ распределительных сетей	128
Шевалдин М. А.	

УДК 621.32

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛИНИЙ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Козловская В.Б., Калечиц В.Н.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Оптимальность работы осветительных линий зависит от решений, закладываемых на стадии проектирования, и реальных эксплуатационных условий.

Текст доклада:

Оптимальность эксплуатации линии наружного освещения при обеспечении необходимого качества освещения оценивается по расходу электроэнергии, сроку службы источников света, расходам на обслуживание и др. Расход электроэнергии на нужды наружного освещения определяется продолжительностью включения осветительных линий, режимом работы, уровнем напряжения, типом источников света.

Выбор конфигурации осветительной сети (удаленность опор, количество, тип и мощность используемых светильников) определяется светотехническим расчетом. В процессе эксплуатации средняя освещенность и средняя яркость по разным причинам (загрязнение, старение и выход из строя светильников и т. д.) могут быть меньше нормируемых значений. Для поддержания данных параметров в необходимых пределах важно обеспечить соответствующие показатели качества электрической энергии при работе линии.

Напряжение в начале осветительных линий определяется напряжением в фазах трансформатора, к которому подключены линии. Силовая нагрузка может оказывать негативное влияние на параметры качества электроэнергии: увеличение отклонений напряжения, искажение синусоидальности напряжения, появление несимметрии напряжений, перенапряжений и провалов напряжения и др. Силовая нагрузка носит изменяющийся характер, поэтому параметры качества электроэнергии в разное время суток отличаются, но должны соответствовать нормам [1].

От правильности выбора площади сечения жил проводников зависит обеспечение требуемых уровней напряжения на зажимах светильников, а также величина потерь мощности в линии и мощность светильников в соответствии с их вольт-амперными характеристиками. В [2,3] на основе расчета режима работы с помощью специально созданных программ показан выбор площади сечения жил проводников осветительной линии. Программы по расчету реализованы в среде Mathcad и учитывают максимально возможную исходную информацию для получения точных параметров возможных режимов работы без учета высших гармоник и с их учетом для линий с односторонним и двусторонним питанием.

На сегодняшний день в качестве источников света в утилитарном наружном освещении наиболее широко используются светильники с дуговыми натриевыми лампами высокого давления, постепенно увеличивается доля светодиодных светильников. Указанные светильники являются источниками высших гармоник, искажают синусоидальность напряжения и приводят к дополнительным потерям напряжения и мощности, что необходимо учитывать при выборе сечений жил проводников в сети наружного освещения. Из-за наличия высших гармоник ток в нулевом проводнике осветительной линии сопоставим с фазными токами, а при несимметричном режиме работы может превышать фазные токи [4]. Напряжение на зажимах светильника определяет возможность зажигания лампы (в том числе повторного). Для гарантированного зажигания напряжение должно быть не менее 90 % от номинального пус-

корректирующей аппаратуры. Частые погасания и зажигания газоразрядных ламп высокого давления по причине провалов напряжения, как и появление перенапряжений, сказываются на сроке службы ламп.

Несимметричная работа осветительных линий вызвана неполнофазным режимом работы, связанным с переходом от вечернего режима к ночному; различным количеством и мощностью светильников, подключенных к каждой фазе; несимметрией напряжений в пункте питания; повреждениями линии (обрыв или короткое замыкание).

Наличие несимметрии напряжений в пункте питания, как и отключение одной фазы, приводит к увеличению токов, потерь мощности и падению напряжения.

Ночной режим работы линии с отключением одной из фаз для экономии электроэнергии можно заменить на режим работы без отключения светильников, реализуемый симметричным понижением фазных напряжений в пункте питания; или на режим работы светильников со снижением активной мощности на 40 % с помощью двухступенчатых ЭМПРА.

Применяя автоматизированные системы управления наружным освещением, имеется возможность сбора информации по осветительным сетям и последующее корректирование режимов работы линий с целью уменьшения расхода электроэнергии.

Контролирование параметров, характеризующих режим работы осветительной линии (ток, напряжение, мощность и др.), и параметров качества электроэнергии, управление может осуществляться не только на уровне пункта питания, но и индивидуально каждым светильником.

Литература

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014 г. Межгосударственный стандарт. – 16 с.
2. Козловская В.Б., Калечиц В.Н. Расчеты режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием (часть 1) / Энергетика (Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ). – 2016. – № 6. – С. 549–562.
3. Козловская В.Б., Калечиц В.Н. Расчеты режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием (часть 2) / Энергетика (Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ). – 2017. – № 1. – С. 30–40.
4. Козловская В.Б., Калечиц В.Н. Учет влияния высших гармоник при выборе сечений проводников линий наружного освещения / Энергетика (Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ). – 2017. – № 6. – С. 544–557.

МОБИЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ КТП 10/0,4 КВ

Казак Д.А.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Обзор решений обеспечения мобильности комплектных трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ.

Текст доклада:

Разработка нефтегазовых месторождений, а также строительство магистральных трубопроводов в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера сопряжено с доставкой и перемещением энергетического оборудования. По мере выработки месторождения либо постройки очередного этапа трубопровода строительная база и рабочий поселок перемещаются на новый объект, экономически целесообразно перемещать и электроэнергетическое оборудование. Для обеспечения мобильности распределительного электрического оборудования существует несколько решений.

Комплектные трансформаторные подстанции (КТП) в метало корпусе, а также КТП в утепленной оболочке из сэндвич-панелей являются наиболее распространенными вариантами электроснабжения жилых и производственных объектов. Размеры блок-боксов позволяют осуществлять транспортировку железнодорожным и автомобильным транспортом на значительные расстояния, а конструкция обеспечивает быстрый монтаж помещений и введение оборудования в эксплуатацию на месте. При этом, для установки КТП необходим подготовленный ленточный фундамент либо свайное поле разрабатываемые под конкретный тип и габарит трансформаторной подстанции.

В некоторых случаях в основании блок-контейнеров предусматривают салазки. Данное решение позволяет отказаться от строительства фундамента, КТП размещается на ровной поверхности, что актуально для временного электроснабжения строительных площадок и применяется в КТП киоскового типа. Салазки дают возможность перемещать КТП волоком на небольшие расстояния при помощи трактора либо погрузчика. В первую очередь это актуально для горнодобывающих производств при регулярном изменении расположения оборудования, в частности, при увеличении длинны элеваторов на терриконах.

Размещение блок-контейнера КТП на автомобильном или тракторном шасси значительно расширяет функциональные возможности изделия, такая комбинация получила наименование мобильная энергетическая установка (МЭУ). Применение шасси, как и в случае с салазками, позволяет отказаться от необходимости строительства фундамента, а также осуществлять перемещение электроэнергетического оборудования без длительных подготовительных работ и использования кранов. МЭУ обладают возможностью транспортирования дорогами общего пользования, размещение на объекте выполняется без привлечения крановой техники. Высокая скорость ввода в эксплуатацию достигается, в том числе, использованием силовых разъемов и розеток для подключения мощных кабелей. Учитывая снижение сроков развертывания, мобильность и простоту интеграции в существующую систему электроснабжения, использование МЭУ видится наиболее перспективным решением для электроснабжения временных жилых и промышленных объектов.

Таким образом, на рынке электроэнергетического оборудования представлено несколько решений обеспечения мобильности КТП, а для выбора оптимального необходимо понимание сроков эксплуатации электрооборудования в конкретной локации.

К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ МИНИЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В АВТОНОМНОМ РЕЖИМЕ

Константинова С.В., Ярошевич Т.М., Капустинский А.Ю.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Надежная работа автономных минэнергокомплексов на основе асинхронного генератора зависит от точности расчета требуемой емкости и создания быстродействующей системы защиты и управления.

Текст доклада:

В настоящее время большое внимание уделяется развитию автономных минэнергокомплексов (МЭК) на основе асинхронных генераторов, как имеющих преимущество по массогабаритным показателям, стоимости и КПД, что играет важную роль в увеличении степени конкурентоспособности минэнергоустановок. Использование асинхронных машин в качестве генераторов в минэнергетике для автономных установок вызывает интерес к вопросам устойчивости и надежности работы системы электроснабжения МЭК на базе АГ. Такие МЭК актуальны для электроснабжения удаленных потребителей, или отдельных хозяйств. Чаще всего для такого типа хозяйств, электропотребителями является активная нагрузка и приводные асинхронные двигатели. Главное отличие такой системы это соизмеримые мощности генератора и потребителя, близкое их взаиморасположение, и, следовательно, значительная электромагнитная взаимосвязь всех элементов электрической системы, что требует необходимости оценки устойчивой работы такой системы и также исследования электромагнитной совместимости элементов.

К недостаткам асинхронного генератора (АГ) можно отнести сложность регулирования напряжения и необходимость применения конденсаторов для возбуждения генераторов при работе его в автономном режиме.

Анализ работы автономных МЭК показывает, что к ним предъявляются требования совместимости их работы с нагрузкой. Эти требования представляют собой объект научных исследований, решения которых определяет эффективность использования МЭК.

Автономный режим работы МЭК предъявляет к установке требования надежного самовозбуждения генератора; надежного запуска электроприводов мощностью соизмеримой с генерирующей установкой; поддержание стабильного напряжения; возможность автоматической работы установки и обеспечения ее целостности в аварийных режимах, для чего необходим большой объем целенаправленных научных исследований и аппаратная реализация специфической контрольно – измерительной аппаратуры. Для реализации параллельной работы многомодульных установок (автономный режим с возможностью включения на параллельную работу нескольких автономных комплексов), добавляются также требования поддержания постоянной частоты ЭДС, наличия приборов для реализации синхронизации, возможности перевода нагрузки с одной установки на другую, устойчивости работы параллельно работающих установок при резких изменениях нагрузки, т.е. обеспечение статической и динамической устойчивости работы полученной системы.

Важнейшей особенностью работы генератора в автономном режиме является то, что мощность потребителей, или даже одного потребителя, всегда практически соизмерима с мощностью генератора. Включение в работу каждого нового потребителя (в частности асинхронного двигателя АД) существенным образом изменяет параметры образованной локальной электрической системы и работу генератора.

Система АГ–АД работает устойчиво при точном расчете емкости конденсаторной батареи для определенной нагрузки. Соответственно, при изменении величины нагрузки, необходимую емкость требуется рассчитать. При пуске АД напряжение и частота в автономной системе электроснабжения заметно меняются, что в свою очередь отражается на характере работы всех остальных потребителей.

Для надежной работы АГ необходимо четко знать наличие потребителей и уметь рассчитать изменяющиеся параметры схемы, чтобы не потерять самовозбуждение АГ. Потеря самовозбуждения АГ эквивалентна отключению всей нагрузки генератора, что ведет к резкому увеличению скорости генератора. Поэтому необходимо надежное устройство отсечки мощности приводного двигателя АГ для безопасности перевода его работы в режим холостого хода без возбуждения АГ.

При наборе асинхронным генератором нагрузки, соизмеримой с мощностью АГ, наблюдается резкое снижение напряжения, снижение частоты вращения первичного двигателя и снижение частоты ЭДС АГ. Поэтому первичный двигатель АГ должен быть оснащен быстродействующим регулятором, реагирующим на величину напряжения и частоту ЭДС АГ, с учетом возможностей генератора по перегрузке. Регулятор должен ограничивать свое действие на первичный двигатель, если ток нагрузки превышает номинальный ток генератора независимо от величины напряжения и частоты ЭДС генератора. Резкое снижение частоты вращения первичного двигателя АГ показывает необходимость создания быстродействующей системы управления МЭК для его нормального функционирования.

Включение в работу любого потребителя (двигателя) изменяет параметры результирующего электрического контура. При этом параметры контура изменяются и в процессе разгона АД.

Разными авторами предложено достаточное количество методов расчета емкости для устойчивой работы АГ. Имея значения параметров схем замещения всех асинхронных двигателей и асинхронного генератора миниэнергокомплекса, можно рассчитать необходимую величину емкости, и определить зону устойчивой работы АГ с нагрузкой в любой момент, для любой нагрузки. Для этого схемы замещения АД сворачивают для каждой заданной частоты для расчета емкости, с учетом работающих и каждым последующим запускаемым АД. Последнее условие реализуется учетом скольжения (s) работающего и запускаемого АД. Для конкретного МЭК, обеспечивающего электроэнергией заданные электропотребители, данный способ определения емкостей позволяет точно определить необходимую величину емкости для устойчивой работы миниэнергокомплекса. Кроме того, легко определяется емкость, необходимая для запуска и работы отдельного АД. В общем случае можно определить и дежурную емкость, которая должна или периодически, или постоянно быть включенной в миниэнергосистему для обеспечения надежного пуска в любой произвольный момент следующего АД или другой нагрузки.

Анализ показывает, что самым сложным режимом работы является автономный режим МЭК с частыми включениями его на параллельную работу с другими МЭК, работающими на нагрузку. В результате анализа необходимой информации для уверенной синхронизации и надежной работы асинхронных генераторов требуется создание блока синхронизации для МЭК.

Измерительные комплекты приборов, системы защиты и управления, используемые для традиционных энергетических комплексов, не могут удовлетворить запросов миниэнергетики по стоимости, количеству, весу и объему. Миниэнергетика требует максимального упрощения, удешевления, уменьшения объемов аналогичных измерительных приборов, систем защиты и управления.

Таким образом, требования к измерительной системе, защите и системе управления МЭК, как в силу специфики работы комплекса в целом, так и в силу особенностей АГ, отличаются от традиционных. К необходимым требованиям блока следует отнести: небольшой вес и га-

бариты; минимальное количество приборов; малое потребление энергии; обеспечение надежной работы.

Достижения промышленной электроники, микропроцессорной техники, позволяющие по-новому решать вопросы автоматизированного и дистанционного управления агрегатами, анализировать режим их работы, решать вопросы качества электрической энергии, ставят миниэнергетику на новый уровень развития. Важнейшими проблемами для обеспечения конкурентоспособности МЭК на сегодняшний день, являются проблемы непрерывного совершенствования и упрощения измерительных систем, систем защиты, автоматизации, синхронизации; вопросы исследования статической и динамической устойчивости работы системы; упрощение методов запуска электроприводов, соизмеримых с мощностью генерирующего устройства вопросы электромагнитной совместимости потребителя и источника электрической энергии; вопросы энергоэффективности работы электрооборудования МЭК.

Литература

1. Вишневский Л.В. Системы управления асинхронными генераторными комплексами / Л.В. Вишневский., А. Е. Пасс – К.: Лыбидь, 1990. – 168 с.
2. Константинова С.В. Электромеханические системы в мини энергетике на основе асинхронного генератора, автореферат диссертации по электротехнике 05.09.03. – Минск, БНТУ, 2000 г.
3. Зачепа Ю.В., Автономные системы электроснабжения на базе асинхронных генераторов, основные требования и структура. / Ю.В. Зачепа / Электромеханические и энергосберегающие системы. – Кременчуг, 2010. – № 2, с. 32–41.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ

Джугля М.Н.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Достижения современной электроники позволяют создать полностью автоматизированную систему управления освещением, обеспечивающую наиболее комфортные условия освещения и одновременно значительную экономию электроэнергии.

Текст доклада:

Системы автоматического управления освещением, условно можно разделить на два основных класса – так называемые локальные и централизованные.

Для локальных систем характерно управление только одной группой светильников, в то время как централизованные системы допускают подключение практически бесконечного числа раздельно управляемых групп светильников.

В свою очередь, по охватываемой сфере управления локальные системы могут быть подразделены на «системы управления светильниками» и «системы управления освещением помещений», а централизованные – на специализированные (только для управления освещением) и общего назначения (для управления всеми инженерными системами здания – отоплением, кондиционированием, пожарной и охранной сигнализацией).

Локальные системы управления освещением.

Локальные «системы управления светильниками» в большинстве случаев не требуют дополнительной проводки, а иногда даже сокращают необходимость в прокладке проводов. Конструктивно они выполняются в малогабаритных корпусах, закрепляемых непосредственно на светильнике или на колбе одной из ламп. Все датчики, как правило, составляют один электронный прибор, в свою очередь, встроенный в корпус самой системы.

Часто светильники, оборудованные датчиками, обмениваются между собой информацией по ходам электрической сети. За счет этого даже в случае, если в здании остался единственный человек, находящийся на его пути светильники останутся включенными.

Централизованные системы управления освещением.

Централизованные системы управления освещением, наиболее полно отвечающие названию «интеллектуальных», строятся на основе микропроцессоров, обеспечивающих возможность практически одновременного многовариантного управления значительным (до нескольких сотен) числом светильников. Такие системы могут применяться либо только для управления освещением, либо также и для взаимодействия с другими системами зданий (например, с телефонной сетью, системами безопасности, вентиляции, отопления и солнцезащитных ограждений).

Централизованные системы выдают также управляющие сигналы на светильники по сигналам локальных датчиков. Однако преобразование сигналов происходит в едином (центральном) узле, что предоставляет дополнительные возможности вручную управлять освещением здания. Одновременно существенно упрощается ручное изменение алгоритма работы системы.

При системах централизованного дистанционного или автоматического управления освещением, питание цепей управления разрешается от линии, питающей освещение. Для помещений, имеющих зоны с разными условиями естественного освещения, управление рабочим освещением должно обеспечивать включение и отключение светильников группами или рядами по мере изменения естественной освещенности помещений.

Существующий ассортимент автоматизированных систем управления освещением (СУО) делится на три класса:

1) СУО светильника – простейшая малогабаритная система, конструктивно являющаяся частью светильника и управляющая только либо одной группой нескольких близлежащих светильников.

2) СУО помещения – самостоятельная система, управляющая одной или несколькими группами светильников в одном или нескольких помещениях.

3) СУО здания – централизованная компьютеризованная система управления, охватывающая освещение и другие системы целого здания или группы зданий.

Безусловным преимуществом СУО светильников является простота их монтажа и эксплуатации, а также надежность. Особенно надежны СУО, не требующие электропитания, так как выходу из строя наиболее подвержены блоки питания СУО и энергопотребляющие микросхемы. Однако если требуется управлять осветительными установками крупных помещений или, например, стоит задача индивидуального управления всеми светильниками в помещении, СУО светильников оказываются достаточно дорогим средством управления, так как требуют установки одной СУО на один светильник. В этом случае удобнее использовать СУО помещений, которые содержат меньше электронных компонентов, чем требуется в предыдущем случае, и поэтому дешевле. СУО помещений представляют собой блоки, размещаемые за подвесными потолками или конструктивно встраиваемые в электрические распределительные щиты. Системы этого типа, как правило, осуществляют одну функцию или фиксированный набор функций, выбор между которыми производится перестановкой переключателей на корпусе или выносном пульте управления системы.

Датчики СУО помещений всегда являются выносными, они должны быть размещены в помещении с управляемыми осветительными установками и к ним необходима специальная проводка, что представляет собой определенное практическое неудобство. Одна из важнейших задач, решаемых в этом направлении, – создание аппаратной базы для автоматизации управления осветительными установками. Создание средств и разработка способов управления искусственным освещением, обеспечивающих возможность экономии электроэнергии за счет максимального использования естественного света, является одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности освещения.

Разработка средств управления освещением на базе современной полупроводниковой техники с использованием микропроцессоров и ЭВМ должна стать основой для создания подсистем АСУ освещением в общей системе АСУ энергоснабжением крупных потребителей электроэнергии.

Перспективы развития средств управления освещением показывают, что разработка их должна быть продолжена на основе использования новых достижений науки.

Литература

1. ТКП 45-2.04-153-2009 Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2013. – 49 с.

2. Козловская В.Б. Электрическое освещение: справочник / В.Б. Козловская, В.Н. Радкевич, В.Н. Сацкевич. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 255 с.

3. Козловская В.Б. Проектирование систем электрического освещения: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» / В.Б. Козловская, В.Н. Радкевич, В.Н. Сацкевич. – Минск: БНТУ, 2008. – 133 с.

4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://minenergo.gov.by/wp-content/uploads/naselenie-jenergija.pdf>

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСПОРТИРОВКИ КТП 10/0,4 КВ МАКСИМАЛЬНОЙ ЗАВОДСКОЙ ГОТОВНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Казак Д.А.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Использование железнодорожного транспорта для поставок комплектных трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ сопряжено с решением нетривиальных конструкторских задач.

Текст доклада:

Географическое расположение перспективных нефтегазовых месторождений в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера в силу удаленности от центров электротехнического производства ставит новые вызовы для подразделений материально-технического снабжения, а также для изготовителей оборудования, в том числе комплектных трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ. Особенно актуально данные вопросы стоят перед белорусскими предприятиями, принимающими участие в освоении российского севера.

Обеспечение надежного электроснабжения на площадке является первоочередной задачей. Если при строительстве новых промышленных объектов зачастую применяются быстровозводимые здания, то для оборудования системы электроснабжения, в первую очередь КТП, используют уже готовые решения – блок-контейнеры с установленным на заводе-изготовителе оборудованием. Такие изделия принято называть КТП максимальной заводской готовности. Выбор того или иного компоновочного и схемного решения 10/0,4 кВ влияет на количество блок-контейнеров, массу и габаритные размеры КТП.

В типовых проектах завод-изготовитель осуществляет доставку блок-контейнеров до склада заказчика автомобильным либо железнодорожным транспортом, при этом расходы на транспортировку ложатся на поставщика. Особенностью северных регионов зачастую является отсутствие автодорожного сообщения с центральными регионами, поэтому основная масса доставляемых грузов приходится на железную дорогу. Компания, обеспечившая максимально быструю и дешевую доставку оборудования, имеет на рынке дополнительное преимущество. Стоимость транспортировки железнодорожным транспортом груза в габарите в два раза ниже, чем груза первой и второй степени негабаритности и в шесть раз ниже, чем в третьем негабарите. Очевидно, белорусские предприятия, удаленные от заказчика, находятся в условиях хуже, чем российские компании-конкуренты за счет больших транспортных издержек.

Использование в качестве габарита транспортных модулей железнодорожного габарита сопряжено со следующими проблемами:

1. Высота и форма крыши транспортных модулей зависит от установленного оборудования. Расстояние от распределительных шкафов КТП до потолка внутри отсека должно составлять не менее 0,3 м согласно пункту 4.2.123 ПУЭ, в случае стыковки на объекте должен обеспечиваться доступ к местам соединений.

2. Оборудование, установленное внутри блок-контейнера, должно быть надежно закреплено и рассчитано на толчки при стыковке вагонов и вибрацию при движении.

3. Для оперативности погрузочно-разгрузочных работ подъемные элементы блок-контейнеров не должны сниматься при транспортировке, а также выступать за размеры железнодорожного габарита.

4. Аппаратура пожарно-охранной сигнализации, установленная на наружных стенах блок-контейнеров, а также элементы дверей и свес крыши не должны выступать за размеры железнодорожного габарита.

5. Длина железнодорожной платформы зачастую позволяет разместить несколько блок-контейнеров, данная возможность ведет к стремлению производителей уменьшить длину модулей до оптимальной.

Учитывая, что транспортные затраты для электротехнических предприятий Республики Беларусь по умолчанию выше аналогичных затрат конкурентов, локализованных в Российской Федерации обеспечение габаритной транспортными блоками КТП и, как следствие, снижение транспортных издержек является важнейшей задачей белорусских производителей КТП.

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ БАШНИ ВЭУ

Горноста́й А.В.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Предлагается использование трехстепенного гироскопа для устройства гашения колебаний башни ВЭУ.

Текст доклада:

Нами предлагается устройство для гашения колебаний башни ВЭУ на основе инерционной массы, выполненной на основе трехстепенного гироскопа, внешняя рама которого жестко закреплена на стержне и посредством внешних полуосей шарнирно связана с внутренней рамой, которая посредством внутренних полуосей шарнирно связана с кожухом гироскопа, причем спиральные пружины закреплены, соответственно, на внешних полуосях и внешней раме, а также на внутренних полуосях и внутренней раме [1], схема которого приведена на рисунке 1.

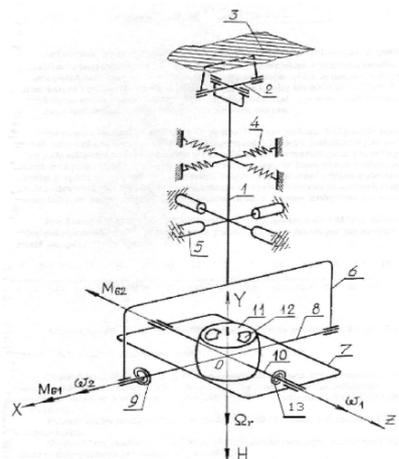


Рис.1. Устройство для гашения колебаний башни ВЭУ

При колебаниях башни ВЭУ, возможных при сильном ветре в плоскости XOY за счет инерции массы гироскопа стержень 1 совершает колебания в этой же плоскости относительно шарнирной опоры 2.

Вращение ротора гироскопа приводит к появлению первичного гироскопического момента. Гироскоп начинает прецессировать, что ведет к появлению вторичного гироскопического момента.

При соответствующей настройке устройства он направлен против момента внешних сил, действующих на башню ВЭУ. При этом суммируются стабилизирующие воздействия на башню ВЭУ от инерционной силы, обусловленной поступательным движением гироскопа и гироскопического момента, что значительно повышает эффективность гашения колебаний башни ВЭУ.

Литература

1. Горноста́й А.В., Ролик Ю.А. Патент на полезную модель РБ 9659, опубл. 30.10.2013 .

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА АВТОНОМНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Калечиц В.Н.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Обоснование использования, выбор типа автономной осветительной установки зависит от ряда факторов.

Текст доклада:

В наружном освещении отдельных объектов при относительной удаленности от пунктов питания, при затрудненности прокладки электрических сетей следует рассматривать возможность применения автономных осветительных установок. Примерами таких объектов являются пешеходные переходы, остановки общественного транспорта, участки дорог, автомобильные стоянки, парки, зоны отдыха, рекламные щиты, места проведения временных работ и другое.

Автономные осветительные установки выбирают в зависимости от следующих факторов:

- 1) целей применения:
стационарные, передвижные;
- 2) условий окружающей среды:
температуры, влажности, степени загрязнения атмосферы;
- 3) климатических особенностей:
среднемесячные скорости ветра, плотность солнечного излучения;
- 4) источников энергии:
фотоэлементы, ветроустановки, дизельный и бензиновый генераторы;
- 5) типа контроллеров:
для солнечных батарей, для ветрогенераторов и другие;
- 6) типа аккумуляторных батарей в сочетании с контроллерами заряда-разряда; места установки аккумуляторных батарей:
под землей, на опоре и т. д.;
- 7) расположения отдельных элементов установки и габаритных размеров установки:
например, в соответствии с [1] минимальная высота установки светильника над проезжей частью дороги должна быть не ниже 6,5 метров;
- 8) светотехнических и электрических характеристик светодиодных источников света; возможностей работы таких источников света в разных режимах:
продолжительная работа, мерцание с определенной частотой); количества и наклона светильников и т. д.;
- 9) системы управления, алгоритмов работы:
включение и отключение светильников с помощью астрономического реле времени, в зависимости от уровня освещенности, наличия движения;
- 10) необходимости в энергосберегающих режимах работы в периоды минимальной выработки электроэнергии и приближении заряда аккумуляторов к минимуму:
например,
 - a) путем уменьшения напряжения на светодиодных светильниках;
 - b) при наличии нескольких светильников частичное отключение их;
 - c) переход на мерцающий режим работы и другое;
11. возможности установки дизельного генератора как резервного источника энергии.

Автономные осветительные установки имеют относительно небольшие эксплуатационные расходы, не требуют прокладки каких-либо сетей, нет необходимости в создании системы учета электроэнергии.

Проектируя и подбирая комплектацию автономных осветительных установок, важно владеть полной информацией об условиях, в которых они будут эксплуатироваться.

Литература

1. ТКП 45-4.04-287-2013 Наружное освещение городов, поселков и сельских населенных пунктов. Правила проектирования. – Минск: Министерство архитектуры и строительства, 2013. – 19 с.

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЛИНИЯХ 6/10 КВ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Казак Д.А.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Обзор решений регулирования напряжения 6/10 кВ на нефтепромыслах.

Текст доклада:

Развитие добычи нефти и газа неразрывно связано с необходимостью строительства и обслуживания протяженных электрических сетей. В силу удаленности месторождений от населенных пунктов электросети зачастую находятся в собственности добывающих компаний, поэтому проблемы обеспечения надежного электроснабжения, а также поддержания заданного уровня напряжения можно выделить отдельно.

Большая протяженность воздушных линий распределительных сетей на отдаленных промыслах может вызвать падение напряжения, в свою очередь это может привести к перебоям в работе основного оборудования, что недопустимо для потребителей I категории, и сопряжено со значительными финансовыми и экологическими потерями.

Еще одна проблема актуальная для питающих сетей нефтегазовых промыслов необходимость электроснабжения не только промышленной, по большей части симметричной трехфазной нагрузки, но и социально-бытовых объектов, таких как административные здания, рабочие поселки, столовые с большим количеством однофазных потребителей. Нагрузка таких объектов, особенно в условиях заполярья, носит ярко выраженный сезонный характер, она значительно возрастает в зимний период, в связи с необходимостью поддержания температурного режима, и снижается до минимума в летний, в связи с минимальными затратами на освещение. Данные сезонные колебания также могут вызывать значительные падения напряжения по фазам, что в свою очередь оказывает дополнительное негативное влияние на работу основного производственного комплекса, в первую очередь мощных компрессоров и насосов.

В трансформаторах класса напряжения 6/10 кВ для компенсации падения напряжения в линиях электропередач массово применяется регулировка напряжения посредством переключения без возбуждения (ПБВ), но данная регулировка не позволяет поддерживать напряжение на заданном уровне в режиме онлайн, а также связана с необходимостью осуществления регулярных механических манипуляций. Использование трехфазных трансформаторов класса напряжения 6/10 кВ с регулированием под нагрузкой (РПН) позволяет эффективно решить проблему падения напряжения при симметричной трехфазной нагрузке, но для оптимального решения проблемы падения напряжения в конкретной фазе необходимо использовать три независимых РПН в каждой катушке. При этом возникает вопрос с осуществлением ремонта одного из РПН в случае необходимости. Кроме того, стоимость и габаритные размеры такого трансформатора будут значительно превышать соответствующие параметры аналогичного трансформатора с ПБВ, а замена, учитывая распространенность РПН на напряжении 6/10 кВ, будет занимать не менее нескольких месяцев. Наиболее успешным решением по обеспечения необходимого уровня напряжения в каждой фазе видится применение однофазных трансформаторов с РПН. Комплекс, состоящий из группы трех таких трансформаторов использующий цифровые решения по контролю напряжения на линии, получил название пункт автоматического регулирования напряжения (ПАРН). Использование однофазных трансформаторов упрощает изготовление, а также снижает итоговую стоимость. В случае выхода из строя одного трансформатора его можно оперативно заменить кабельной вставкой, при этом регулирование напряжения в оставшихся фазах будет обеспечиваться.

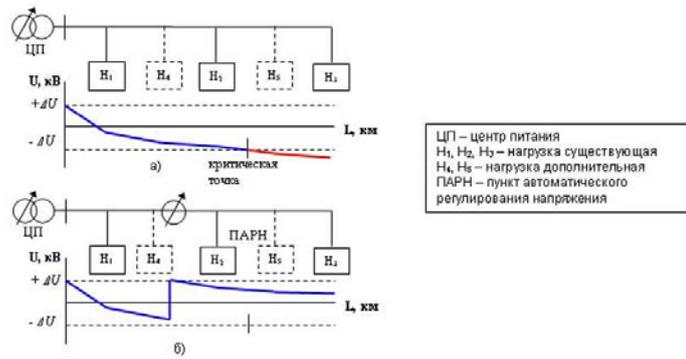


Рис.1. распределение напряжения по длине ЛЭП:
 а) при отсутствии ПАРН; б) при установке ПАРН

Сложности доставки ПАРН к удаленным местам эксплуатации, особые климатические условия, а также габаритные размеры трансформаторов привели к установке данных изделий в блочно-модульных утепленных зданиях. Такое решение позволяет не только решать возникающие проблемы с падением напряжения, но и делать это максимально оперативно.

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАСТИ ВЭУ

Горноста́й А.В.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Предлагается использование двухстепенного гироскопа для устройства гашения колебаний лопасти ВЭУ.

Текст доклада:

Нами предлагается устройство для гашения колебаний лопасти ВЭУ на основе инерционной массы, выполненной на основе двухстепенного гироскопа, внешняя рама которого жестко закреплена на стержне, а кожух жестко закреплен на полуосях, шарнирно установленных на внешней рамке, причем полуоси соединены с внешней рамкой посредством пружин, схема которого приведена на рисунке 1 [1].

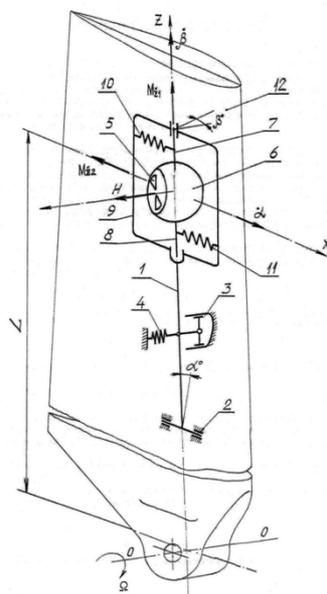


Рис.1. Устройство для гашения колебаний лопасти ВЭУ

Ротор гироскопа приводится во вращение и обладает кинетическим моментом. При упругих колебаниях консоли за счет инерции массы ротора с кожухом стержень колеблется относительно оси $n-n$, при этом гироскоп совершает поступательное движение вдоль оси OY и вращается вокруг оси OX . Такое вращение приводит к появлению гироскопического момента и гироскоп начинает прецессировать, что ведет к возникновению гироскопического момента, который при соответствующей настройке гасителя направлен против момента внешних сил, возбуждающих колебания консоли и, следовательно, уменьшает амплитуду ее колебаний.

Эффективность работы гасителя зависит, в первую очередь, от правильности его частотной настройки и выбора параметров демпфера.

Литература

1. Горноста́й А.В., Ролик Ю.А. Патент на полезную модель РБ 9657, опубл. 30.10.2013.

КАСКАДИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Капустинский А.Ю.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

В данной статье произведен обзор методики выбора автоматических выключателей с учетом ограничения тока короткого замыкания вышестоящим аппаратом, а также произведено описание методики токоограничения и преимуществ данной методики выбора защитных аппаратов.

Текст доклада:

Необходимость установки для питания собственных нужд автоматических выключателей с невысокими номинальными токами (до 16 ампер) в щитах, номинальный ток вводных аппаратов которых исчисляется тысячами ампер, приводит к частой необходимости завышения номинального тока автоматического выключателя и установки дорогостоящего регулируемого расцепителя ввиду высокого значения тока короткого замыкания. Поиск решения данной проблемы привел к созданию методики каскадирования автоматических выключателей.

Метод каскадирования автоматических выключателей заключается в том, что при помощи вышестоящего токоограничивающего выключателя становится возможным применение нижестоящих автоматических выключателей с более низкой отключающей способностью. При высоком значении протекающих через вышестоящий автоматический выключатель токов короткого замыкания данный защитный аппарат размыкает свои контакты на небольшое расстояние. Для этого применяют автоматические выключатели с особой конструкцией размыкаемых контактов. Конструкция контактов должна позволять электродинамическому усилию, возникающему при протекании тока короткого замыкания, частично преодолеть усилие сжатия, приложенное к контактам. При размыкании контактов появившаяся в месте размыкания контактов электрическая дуга увеличивает полное сопротивление цепи протекания тока короткого замыкания, за счет чего и происходит снижение протекающего тока короткого замыкания. При отключении тока короткого замыкания нижестоящим защитным аппаратом и локализации места повреждения ток короткого замыкания перестает протекать по вышестоящему аппарату, электродинамические усилия значительно снижаются, контакты выключателя вновь замыкаются.

Для обоснования установки автоматического выключателя с низким значением отключающей способности в сети с высокими значениями токов короткого замыкания производителем защитных аппаратов производятся расчеты, которые должны быть подтверждены лабораторными испытаниями. В результате данных испытаний составляются таблицы каскадирования, в которых указаны допустимые значения отключаемых токов короткого замыкания (усиленная отключающая способность) нижестоящего автоматического выключателя при применении вышестоящего автоматического выключателя с определенным номинальным током с функцией токоограничения.

Таким образом, применение методики каскадирования позволяет не производить завышение номинального тока автоматического выключателя для применения в сети с высокими значениями токов короткого замыкания, что приводит к удешевлению сети. Помимо этого, данная методика может применяться для любого нижестоящего аппарата, что приводит к значительному снижению стоимости электрооборудования. В некоторых случаях, помимо снижения стоимости, удается добиться уменьшения габаритов защитных аппаратов и, как следствие, распределительного устройства в целом. Ввиду данных преимуществ в настоящее время распространение методики каскадного отключения при проектировании промышленных предприятий и коммунально-бытовых объектов находит все большее распространение, и все больше производителей автоматических выключателей производят необходимые исследования выпускаемой продукции.

ВЛИЯНИЕ ГАРМОНИК НА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Колосова И.В.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Применение фильтров, устанавливаемых у потребителя, приводит к существенному улучшению кривой напряжения

Текст доклада:

Электромагнитная совместимость технических средств: способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средством. В идеальной энергосистеме энергия должна передаваться при номинальных значениях частоты и напряжения, не изменяющихся во времени. Эти условия не выполняются вследствие того, что многие потребители электроэнергии имеют нелинейные характеристики нагрузки (вентильные преобразователи, силовая электронная преобразовательная техника, электродуговые сталеплавильные печи). Возросший интерес к этой проблеме связан с увеличением числа и единичной мощности нелинейных электронных устройств, используемых для управления силовыми установками. Отклонения форм кривых тока и напряжения от правильной синусоиды обычно представляют с помощью гармонических составляющих. Различают гармоники в установившихся режимах, когда форма кривой не изменяется, и гармоники в переходных режимах форма кривой меняется от цикла к циклу. Существенной характеристикой, определяющей форму кривой, является угол сдвига гармоники по отношению к гармонике основной частоты. Гармоники воздействуют на все виды электрического оборудования, находящегося на довольно большом расстоянии от места их генерации. Наибольшее влияние оказывают гармоники, возникающие в силовых цепях, на качество звука телефонной связи, снижающегося из-за наводимого гармонического шума. Есть и более опасные воздействия, выражающиеся в ложных срабатываниях ответственной управляющей и защитной аппаратуры, перегрузке силовых аппаратов и систем, разрушение силовых конденсаторов. Это приводит к частым ремонтам или заменам элементов. В этом случае применение фильтров, устанавливаемых у потребителя, приводит к существенному улучшению кривой напряжения. Использование управляемых выпрямителей увеличивает уровень гармоник тока в сетях. При разработке такого оборудования обычно предполагают, что напряжение в точке присоединения синусоидально. Это возможно лишь в случае, если энергосистема, питающая оборудование, имеет малое гармоническое сопротивление. В этом случае мелкие потребители подвергаются дополнительным опасностям, связанным с влиянием гармоник на управляющее оборудование, установленное в их сетях. Энергоснабжающие организации обычно снимают с себя ответственность за причины возникновения гармоник, вводя стандарты по ограничению уровней гармонических составляющих в точках общего присоединения потребителей. Знания о гармониках тока исходят в основном из физической сущности явления и разработанные стандарты являются результатом анализа предшествующего практического опыта, используемого для того, чтобы избежать появления подобных проблем в будущем. После того как выявлены источники гармоник и определены их уровни, необходимо выяснить характер влияния гармоник на работу электрооборудования. Все элементы систем электроснабжения должны быть рассмотрены с точки зрения их чувствительности к гармоникам.

Основными формами воздействия высших гармоник на системы электроснабжения являются: увеличение токов и напряжений гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов; снижение эффективности процессов генерации, передачи и использо-

вания электроэнергии; старение изоляции электрооборудования и сокращение срока его службы; ложная работа оборудования. Гармоники напряжения и тока приводят к дополнительным потерям электроэнергии и напряжения, токам утечки, в линиях сверхвысокого напряжения потерям энергии на корону, нарушению работы устройств защиты, искажению изображения и яркости экранов. Гармоники влияют на оборудование с регулируемой тиристорами частотой вращения, на зажигание не в требуемый момент, а резонанс между различными типами оборудования может привести к перенапряжениям и качаниям машин. Потребитель, не испытывающий затруднений с тиристорно – управляемым оборудованием в своих сетях, не окажет влияние и на другие потребители. Потребители, питающиеся от разных шин, теоретически могут влиять друг на друга, однако электрическая удаленность снижает вероятность такого взаимодействия. Для уменьшения амплитуды токов или напряжений одной или нескольких фиксированных частот в энергосистемах применяются параллельные фильтры. Если необходимо избежать проникновения токов определенной частоты в отдельные узлы подстанции или части энергосистемы, можно использовать последовательные фильтры, состоящие из параллельно включенных конденсатора и катушки индуктивности, создающих большое сопротивление протеканию тока на выбранной частоте. Однако такое решение не может быть применено для ограничения уровня напряжений гармоник самого источника, поскольку генерация гармоник нелинейными элементами подстанции является неотъемлемой частью их нормальной работы. Для минимизации тока и напряжения гармоник возможно создание комбинированных последовательно-параллельных фильтров, однако, для этого необходимы большие затраты.

ОЦЕНКА РАБОТЫ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП НА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЕ

Смоловская Д.М.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Работа газоразрядных ламп на повышенной частоте обеспечивается добавлением в цепь электронной пускорегулирующей аппаратуры, которая имеет ряд преимуществ.

Текст доклада:

Чтобы устранить недостатки работы ЭМПРА, необходимо подавать к лампам ток повышенной частоты. На практике это осуществляется в виде совместного использования с газоразрядной лампой низкого давления сложного электронного прибора. Электронный пускорегулирующий аппарат изменяет начальное напряжение сети и в тоже время осуществляет контроль за запуском светильников.

При повышении частоты питающего напряжения в люминесцентных лампах низкого давления значения токов, коэффициентов мощности и напряжений с различными видами балластов сближаются между собой, а начиная с частот 800–1000 Гц, практически перестают зависеть от типа балласта.

Отличительная черта ЭПРА состоит в том, что их рабочий частотный диапазон превышает уровень в 30 кГц. На повышенной частоте питание ламп улучшает их главные характеристики и позволяет им функционировать более эффективно. Сочетание осветительного прибора и ЭПРА, имеет ряд важных преимуществ:

- горение лампы происходит с минимальной задержкой времени;
- используемая комбинация не приводит к сокращению срока службы лампы;
- при данной вариации осветительному прибору не грозит поражение током;
- меньший спад светового потока из-за меньшей нагрузки люминесцентной лампы, и, соответственно, меньшему затемнению концов колбы лампы;
- ЭПРА предохраняют лампу от "скачков" напряжения в пределах 5–10 %;
- во время работы светильника не наблюдается мерцание света;
- ЭПРА допускают работу при входном напряжении постоянного тока, что часто требуется в системах аварийного освещения;
- обеспечивается высокий порог КПД;
- обеспечиваемая мощность намного превышает традиционную схему и достигает значения 0,9.

Пульсации светового потока в значительной степени снижаются и на частоте 1000 Гц и выше настолько малы, что во время работы лампы отсутствует мигание. Для этой цели в конструкции балласта используется генератор, который преобразовывает постоянное напряжение в переменное напряжение частотой 50 КГц, которое устраняет пульсации светового потока. Выдаваемый световой поток поступает равномерно, что препятствует появлению стробоскопического эффекта.

Благодаря новейшим моделям ЭПРА появляется возможность для создания более комфортного освещения, которое проявляется в не образовании посторонних шумов в ходе эксплуатации аппаратуры. У светильников с пускорегулирующим устройством исключена возможность появления акустического шума в виде низкочастотного гула при неисправности электрической схемы. Также применяется плавный пуск – постепенное увеличение яркости свечения в течение заданного интервала времени. ЭПРА стабилизирует силу тока питания лампы за счет подачи стабильного питающего напряжения. Благодаря этому увеличивается

срок службы лампы до 50 %, поскольку токи на пусковых режимах значительно превышают номинальное значение, а это может привести к выходу лампы из строя.

Общее снижение энергопотребления осветительного прибора при использовании ЭПРА может достигать 60 %. А потери мощности в ПРА снижаются в 1,5–2 раза и составляют всего лишь 8–10 % от мощности ламп. ЭПРА существенно увеличивают степень безопасности эксплуатации осветительных приборов, поскольку обеспечивают защиту от короткого замыкания и перегрева, подавление радиочастотных помех, отключение неисправных источников света, плавный автоматический перезапуск лампы.

ЭПРА делают лампу более экономичной, что проявляется в следующем:

- в отличие от ЭмПРА расход мощности сокращается на треть;
- с ростом частоты до 20 кГц световая отдача источников света увеличивается примерно на 10–25 %;
- аппаратура работает не на пределе своих возможностей, что увеличивает ее срок службы по сравнению с ЭмПРА;
- добиться экономии на техническом обслуживании помогает бережливый режим работы ЭПРА;
- снизить эксплуатационные издержки можно за счет сокращения числа заменяемых ламп и отсутствия необходимости замены стартеров;
- нагрев лампы в ходе работы относительно мал, поэтому система кондиционирования задействована не на полную, тем самым продлевается срок эксплуатации лампы;
- высокая экономичность обеспечивается дополнительным энергосбережением до 80 % при работе в системах управления светом, ведь применение ЭПРА позволяет осуществлять регулирование светового потока (деммирование);
- миниатюризация электронных компонентов привела к тому, что размер электронного балласта уменьшился. Вследствие этого происходит значительная экономия на материалах: медь и электрическая сталь. Кроме того, в результате создания высокостабильных узкополосных люминофоров стала возможна разработка компактных люминесцентных ламп (КЛЛ) для использования в домашних условиях (для освещения жилья).

Использование ЭПРА для питания газоразрядных ламп высокого давления вызывает интерес из-за ряда причин. ГЛВД очень чувствительны к перегрузке по мощности, а обычные электромагнитные балласты не в состоянии обеспечить стабилизацию мощности на необходимом уровне, если изменятся условия эксплуатации лампы или ее характеристики в процессе старения.

Применение ЭПРА позволяет рационально управлять лампой в рабочем и аномальном режимах. Это приводит к уменьшению затрат, так как даже при небольшом увеличении напряжения сети срок службы лампы сокращается в среднем в 2 раза, что требует более частую замену ламп. Эксплуатация ЭПРА позволяет также осуществлять управление светом без дополнительных усложнений питающей сети, регулировать мощность лампы в зависимости от времени суток и изменяемых условий облученности. Экономия электроэнергии благодаря более высокому КПД ЭПРА и возможности управления энергетическим потоком может достигать 40 % по сравнению с питанием от электромагнитного ПРА.

К одному из главных достоинств ЭПРА для ГЛВД можно отнести практически полное отсутствие пульсаций светового потока ламп. Однако световая отдача увеличивается мало из-за небольшой доли анодно-катодных участков в длине разряда высокого давления и срок службы увеличивается незначительно.

Преимущество ЭПРА для ГЛВД является группировка в одном аппарате трех элементов: зажигающего устройства, балласта и компенсирующего конденсатора, что ощутимо снижает массу аппаратов и повышает надежность зажигания.

Применение ЭПРА стабилизирует мощность ламп и тем самым предоставляет более высокую временную стабильность их светотехнических характеристик – светового потока и цветовой температуры. Электронный балласт изначально работает как стартер для дуги, по-

дачи импульса высокого напряжения, а затем, он работает как ограничитель, регулятор электрического потока внутри контура.

Можно выделить следующие преимущества питания газоразрядных ламп высокого давления токами повышенной частоты:

- за счет регулирования мощности в широком диапазоне измерения питающего напряжения и оптимизации режима розжига повышается срок службы лампы;
- за счет повышения срока службы и отсутствия необходимости в замене импульсных зажигающих устройств, уменьшаются эксплуатационные расходы на смену ламп;
- экономия электроэнергии по сравнению с электромагнитными аппаратами за счет высокого КПД (более 0,93);
- высокий коэффициент мощности (более 0,98);
- за счет питания ламп током повышенной частоты осуществляется бесшумная работа светильника;
- благодаря работе на повышенной частоте с высоким КПД, наличию встроенного устройства зажигания и отсутствию необходимости в дополнительном оборудовании для компенсации реактивной мощности, аппараты имеют малую массу и габариты;
- отсутствие бросков токов коммутационных токов в силовой питающей цепи при включении аппаратов;
- отсутствие необходимости в обслуживании аппаратов;
- возможность подключения к линии большего числа светильников при полном отсутствии фактора разности уровня освещенности в начале и в конце линии;
- отсутствие низкочастотной пульсации светового потока;
- больший срок службы лампы благодаря возможности контролировать мощность – «мягкий» старт и стабилизация мощности на лампе при старении;
- возможность соединять ЭПРА в интеллектуальные сети.

Комбинации, при которой ГЛВД дополняется ЭПРА, имеют ряд недостатков:

- световая отдача ГЛВД на повышенных частотах почти не растет;
- значительная часть ГЛВД используется в системе наружного освещения, где пульсация светового потока не нормируется;
- применение газоразрядных ламп рекомендуется только с защитным стеклом, качественными комплектующими и квалифицированной сборкой схемы, иначе они небезопасны для использования. Так, например, взрыв лампы или короткое замыкание в цепи может привести к пожару;
- газоразрядные лампы светят в полную силу не сразу, а по истечении 2–7 минут;
- отсутствием мощных надежных дешевых транзисторов.

Таким образом, электронная пускорегулирующая аппаратура для питания газоразрядных ламп имеет ряд недостатков, но, в свою очередь, она необходима не только для запуска лампы, а также для осуществления поддержки рабочего состояния осветительного прибора.

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МИНИЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ

Ярошевич Т.М.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Рассматриваются системы электроснабжения предприятий с небольшой мощностью, или значительно удаленные от сетей энергосистемы, в качестве источника питания которых могут использоваться мини энергоустановки (МЭУ).

Текст доклада:

Обеспечение электроэнергией производственных, коммунально-бытовых, сельскохозяйственных и прочих объектов осуществляется с помощью систем электроснабжения (СЭС). СЭС – это совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электроэнергией. Под электроустановкой понимается любое сочетание взаимосвязанного электрооборудования в пределах данного пространства или помещения. При этом к электрооборудованию относится любое оборудование, предназначенное для производства, преобразования, передачи, распределения или потребления электрической энергии (например, электрические машины, трансформаторы, аппараты, измерительные приборы, устройства защиты, кабельная продукция и т. п.).

Система электроснабжения производственного объекта может быть автономной и в составе электроэнергетической системы. В первом случае выработка электроэнергии, ее преобразование, передача и распределение между электроприемниками реализуется в пределах данного объекта, находящегося в определенной собственности. Применение такой СЭС предприятия должно быть технико-экономически обосновано. Они могут быть целесообразны при значительном удалении производственного объекта от электрических сетей энергосистемы. В основном это относится к предприятиям небольшой мощности (предприятия по переработке сельскохозяйственной продукции, асфальтобетонные заводы и т. д.).

При другом варианте построения СЭС производство электроэнергии осуществляется централизованно на электростанциях энергосистемы. В этом случае выработка электроэнергии, ее преобразование и передача возлагается на электроэнергетическую систему как централизованного источника питания, а распределение и доведение энергии до электроприемников выполняет СЭС объекта. Данный вариант, получивший наибольшее распространение на практике, обеспечивает высокую надежность и качество электроснабжения промышленных объектов.

Рассмотрим СЭС для предприятий с небольшой мощностью или значительно удаленными от сетей энергосистемы, в качестве источника питания которых могут использоваться мини энергоустановки (МЭУ).

Мини энергоустановки могут использоваться:

- для экономии не возобновляемых энергоресурсов. Эти установки предназначены для работы параллельно с энергосистемой. К ним предъявляется требование выработки качественной электроэнергии;
- для экономии не возобновляемых энергоресурсов и дополнительно решает вопросы полного энергообеспечения отдельных объектов с учетом надежности их питания.

Можно выделить следующие режимы работы мини энергоустановок:

- автономный режим, предъявляет к установке следующие требования: надежное самовозбуждения генератора; надежный запуск электроприводов мощностью соизмеримой с генерирующей установкой; поддержание стабильного напряжения; возможность автоматической работы установки и обеспечения ее целостности в аварийных режимах;

– автономный режим с возможностью включения на параллельную работу нескольких автономных комплексов. Кроме требований, указанных для первого режима, в этом случае добавляются также требования поддержания постоянной частоты ЭДС, наличия приборов для реализации синхронизации, возможности перевода нагрузки с одной установки на другую, устойчивости работы параллельно работающих установок при резких изменениях нагрузки, т. е. обеспечение статической и динамической устойчивости работы полученной системы;

– автономный режим МЭУ с периодическим подключением его на работу параллельно с мощной электросистемой. При необходимости периодического подключения МЭУ к мощной электрической сети, последний должен надежно работать в автономном режиме и обеспечивать простоту периодических синхронизаций комплекса с электрической сетью, когда комплекс работает с электрической нагрузкой, перерыв питания которой нежелателен;

– постоянная работа МЭУ параллельно с мощной электросистемой. Это наиболее простой режим работы комплекса. Включение МЭУ на параллельную работу с сетью возможен по методу самосинхронизации, что требует оборудования МЭУ минимальным количеством измерительной аппаратурой и реализации постоянства параметров напряжения и частоты ЭДС на зажимах генерирующего устройства;

– работа МЭУ параллельно с сетью, когда напряжение сети подвержено колебаниям. При таком режиме важное значение имеет решение вопросов устойчивости работы мини энергокомплекса и надежной защиты комплекса от перегрузок;

– использование электросистемы в качестве демпфера для работы мини энергокомплекса. Смысл режима заключается в облегчении работы комплекса при набросе нагрузки, обеспечении пусковых режимов асинхронных приводов за счет использования мощности системы. В нормальном, установившемся режиме мини энергокомплекс полностью покрывает нагрузку объекта. В этом случае приобретает повышенный интерес точный учет потребляемой из сети и выдаваемой в сеть электрической энергии.

Так как СЭС состоит из большого числа различных технических устройств, генерирующих, передающих и преобразующих энергию в другой ее вид. Условия работы этих всех устройств резко отличаются друг от друга и носят случайный характер. Например, электроприемники случайно могут быть или включенными, или отключенными от электрической сети, работать с той или иной степенью использования. В результате других случайных событий, возникающих в результате неблагоприятных условий могут возникнуть аварийные повреждения отдельных элементов СЭС или снижение располагаемой мощности и т. д. Поскольку аварийные повреждения являются случайными событиями, то возникает необходимость определять вероятность повреждения двух, трех и более устройств элементов СЭС. Так же необходимо определять вероятность отсутствия повреждения устройств СЭС, так как эта величина характеризует надежность работы всего оборудования в целом. Эти задачи возникают при выборе оптимального режима МЭУ с обеспечением надежности энергией объектов, за выдачу в сеть качественную электроэнергию в нужном количестве, на которое она рассчитана или надежное питание отдельных потребителей, или устойчивость системы, или только для экономики энергоресурсов и т. д.

Вероятность отдельных повреждений или случайных событий, которые могут привести к аварийной ситуации, недоотпуску энергии, ущербу, к дополнительным затратам и т. д. можно определить с помощью статистической вероятностью на основании длительного наблюдения за данным или однотипным оборудованием.

ТЕНДЕНЦИИ В ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

Протасеня М.Л.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Рассматриваются электродвигатели для использования в горнодобывающей отрасли.

Текст доклада:

В рудничном электроприводе применяются электродвигатели постоянного и переменного тока. Электродвигатели постоянного тока применяются для приводов, где требуется плавное регулирование скорости в широких пределах (комбайны, подъемные машины, электровозы и др.). На шахте есть небольшое количество таких двигателей.

Для привода забойных машин, механизмов и машин поверхностного комплекса применяются электродвигатели переменного тока: синхронные и асинхронные с короткозамкнутым и фазным ротором.

Синхронные электродвигатели применяются для привода крупных установок с постоянным моментом сопротивления (компрессоры, вентиляционные, насосные).

Асинхронные электродвигатели с фазным ротором применяются на установках, где требуется регулировка скорости в широких пределах, а также в случае необходимости запуска мощного двигателя под нагрузкой при относительно небольшой мощности электрической сети.

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором применяются для привода самых разнообразных машин во всех случаях, где не требуется регулирования скорости.

Основное напряжение переменного тока электродвигателей забойных машин и механизмов, а также основной массы машин и механизмов на поверхности 400–690 В, а для ручного инструмента – 130 В. Электродвигатели переменного тока стационарных установок выполняются на напряжение 6–10 кВ. Для электродвигателей постоянного тока используется напряжение 110–440 В. В настоящее время созданы высокопроизводительные, мощные забойные машины, требующие высокого уровня энерговооруженности, поэтому начат выпуск электродвигателей переменного тока на номинальное напряжение 1140 В.

В условиях шахт наиболее широко распространены электродвигатели с частотой вращения от 750 до 3000 об/мин, которые относятся к быстроходным (1500–6000 об/мин) и средней скорости (250–1000 об/мин).

По величине номинальной мощности в горном машиностроении в соответствии с ГОСТ 16311–75 и ГОСТ 6661–75 производятся электродвигатели двух групп – от 132 до 1000 кВт и от 0,25 до 100 кВт.

По способу охлаждения в шахте применяются электродвигатели с искусственным охлаждением, имеющие специальные вентиляционные устройства, которые создают внутри или снаружи двигателя принудительную циркуляцию воздуха или другой охлаждающей среды – конструкции с внутренней и наружной самовентиляцией и с жидкостным (водяным) охлаждением. Электродвигатели с естественным охлаждением, не имеющие специальных устройств для вентиляции, в основном не используются.

По конструкции в горнодобывающей отрасли применяются электродвигатели, выполненные горизонтально, вертикально, фланцевые, встроены, торцевыми, двойного вращения, с внешним ротором.

В частности, широко используются электродвигатели синхронные трехфазные серии СД2 с цифровой системой возбуждения КОСУР 103, предназначенные для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (насосы, вентиляторы и др.). Двигатели

спроектированы для работы от сети переменного тока частотой 50 Гц. Номинальное напряжение двигателей 6000 В, коэффициент мощности (при опережающем токе) 0,9.

Эти двигатели поставляются в комплекте с тиристорным возбуждательным устройством (ТВУ), которое обеспечивает:

- автоматическую подачу возбуждения в функции тока статора;
- увеличение тока возбуждения до $1,4 I_{в. ном}$ при падении напряжения сети на 15–20 % от номинального значения;
- форсированное гашение поля ротора переводом преобразователя в инверторный режим;
- защиту двигателя от внутренних и внешних коротких замыканий.

Они рассчитаны на прямой пуск от полного напряжения сети. Обмотка возбуждения при пуске должна быть замкнута на пусковое сопротивление, расположенное в возбуждательном устройстве. Двигатели допускают два пуска подряд из холодного состояния и один пуск из горячего состояния. Двигатели имеют подшипники качения с пластичной смазкой.

Вид климатического исполнения – У3, О4.

Номинальный режим работы – продолжительный S1.

Конструктивное исполнение двигателей – IM1001.

Способ охлаждения двигателей – IC01.

Степень защиты двигателей – IP21.

Изоляция обмотки статора терморезистивная типа «Монолит-2» класса нагревостойкости не ниже «В». Изоляция обмотки ротора класса нагревостойкости «В». Соединение фаз обмотки статора – звезда. Обмотка статора имеет шесть выводных концов. Двигатели допускают правое и левое направление вращения. Реверс осуществляется только из состояния покоя.

Двигатели соединяются с приводимыми механизмами посредством упругих муфт.

Литература

1. Кацман, М. М. Электрические машины. – 15-е изд., стер. – Москва: Академия, 2016. – 492 с.: ил. – (Профессиональное образование. Профессиональный модуль)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖКАЛИБРОВОЧНОГО ИНТЕРВАЛА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Анищенко В.А., Писарук Т.В.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Рассматривается методика обоснованного выбора межкалибровочного интервала измерительных каналов автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) на основании результатов контроля достоверности измерительной информации по фактическому состоянию системы.

Текст доклада:

Показатели потребления электроэнергии промышленного предприятия определяются с помощью АСКУЭ. Запланированная точность измерений поддерживается путем периодической регулировки и (или) ремонта системы с последующей калибровкой измерительных каналов.

Установленный межкалибровочный интервал определяется нормативной документацией, однако это не гарантирует преждевременного снижения точности измерений до истечения установленного срока. В то же время, АСКУЭ может сохранить нормативные параметры к окончанию межкалибровочного интервала и новая калибровка, которая требует финансовых затрат, может оказаться преждевременной. Поэтому рационально перейти от калибровки с фиксированным интервалом времени к калибровке по фактическому состоянию системы, определенному на основе статистической обработки измерений электрической нагрузки без вывода системы учета из работы. Задача может быть решена с использованием методов оперативного контроля достоверности измерений [1–3]:

- контроля достоверности измерений нагрузки по ее предельным значениям;
- контроля достоверности измерений нагрузки по предельным значениям ее приращений или их экстраполированным значениям.

Условие достоверности измерений активной нагрузки предприятия $P(t)$ выглядит следующим образом:

$$P_n(t) \leq P(t) \leq P_v(t), \quad (1)$$

где $P_n(t)$ и $P_v(t)$ – соответственно нижняя и верхняя границы достоверных результатов измерений в нормальном режиме работы предприятия.

Так как нагрузка промышленных предприятий носит неравномерный характер, границы достоверности зависят от времени, и, чтобы их определить, необходимо осреднять значения нагрузки.

Погрешности осреднения влияют на границы достоверности $P_n(t)$ и $P_v(t)$ и снижают эффективность контроля достоверности измерений по предельным значениям.

Метод контроля по предельным приращениям, в свою очередь, позволяет анализировать динамику изменений нагрузки.

Временная дискретизация измерений нагрузки и переход от случайного процесса к случайной последовательности дает возможность судить о скорости измерений нагрузки по первым приращениям.

Первое приращение нагрузки за интервал времени $(t, t-h)$ можно определить, как разность показаний АСКУЭ, зафиксированных во время t , т. е. значение $P(t)$, и показания, зафиксиро-

ванного в предыдущий момент времени $t-h$, т. е. значение $P(t-h)$, где h – интервал временной дискретизации

$$\Delta P(t, t-h) = P(t) - P(t-h). \quad (2)$$

Метод контроля по предельным приращениям нагрузки рационально производить для стационарных участков графика нагрузки, когда абсолютные значения положительных и отрицательных значений приращений нагрузки равны, а математическое ожидание близко к нулю.

Среднеквадратическое отклонение в таком случае определяется по формуле

$$\sigma_{\Delta P} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta P_i^2}, \quad (3)$$

где n – число измерений на стационарных участках графика нагрузки.

Был рассмотрен график дневной нагрузки Минского моторного завода (рис. 1), выполненный по результатам работы системы учета 25.03.2020 года.

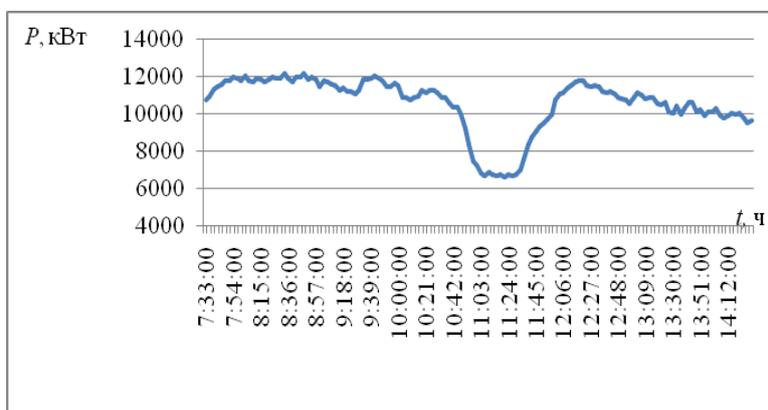


Рис. 1. Графики дневной нагрузки Моторного завода

На рисунке 2 представлены первые приращения нагрузки, соответствующие этому графику.

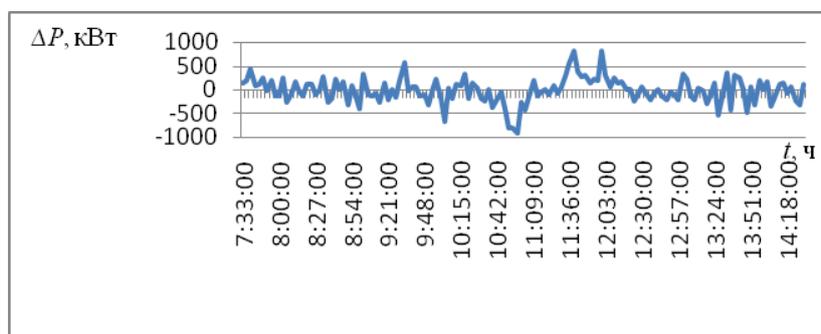


Рис. 2. Первые приращения нагрузки Моторного завода

Стационарный процесс изменения нагрузки промышленного предприятия можно наблюдать в дневные часы (за исключением обеденного перерыва).

Достоверность приращений нагрузки, определенных по (2) определяется границей принятия решения о достоверности γ , которое представляет собой предельно допустимое отклонение приращения с доверительной вероятностью ρ :

$$\gamma = \Delta_{\rho} = K_{\rho} \sigma_{\Delta P}. \quad (4)$$

Условие достоверности приращения нагрузки можно выразить:

$$|\Delta P(t, t-h)| \leq \gamma. \quad (5)$$

Своевременная калибровка измерительных каналов соответствует условию

$$\rho_{\text{факт}} < \rho_{\text{уст}}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{уст}}$ – установленная в результате калибровки доверительная вероятность; $\rho_{\text{факт}}$ – фактическая доверительная вероятность, определенная по результатам обработки результатов измерений нагрузки:

$$\rho_{\text{факт}} = \frac{n_{\text{д}}}{n_{\text{д}} + n_{\text{нд}}}, \quad (7)$$

где $n_{\text{д}}$ – число достоверных приращений нагрузки; $n_{\text{нд}}$ – число недостоверных измерений, превышающих допустимое отклонение.

Статистическая обработка результатов измерений нагрузки позволяет определить текущее состояние системы учета электроэнергии, а также позволяет обоснованно увеличивать либо уменьшать межкалибровочный интервал системы учета электроэнергии.

Литература

1. Анищенко, В.А. Надежность измерительной информации в системах электроснабжения / В.А. Анищенко. – Минск: БГПА, 2020. – 128 с.
2. Анищенко, В.А. Эффективность контроля достоверности измерений в автоматизированных системах управления энергосистемами по предельным значениям / В.А. Анищенко, Т.В. Писарук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергообъединений СНГ. – 2017. – Т. 60. – № 5. – С. 402–416.
3. Анищенко, В.А. Контроль достоверности измерений в энергосистемах по первым приращениям и на основе экстраполирующих фильтров / В.А. Анищенко, Т.В. Писарук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергообъединений СНГ. – 2018. – Т. 61. – № 5. – С. 423–431.

**ИНТЕРАКТИВНЫЕ МОДУЛИ В РЕЖИМЕ ОНЛАЙН
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «КИРЭС»**

Гецман Е.М.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Представлены особенности использования информационно-коммуникационных технологий в образовательном процессе преподавания технических дисциплин.

Текст доклада:

Чем активнее растет объем информации, циркулирующей в мире, тем быстрее развиваются технологии ее обработки, хранения и передачи. Сейчас практически нет сферы общественной жизни, которая, так или иначе, не была бы связана с информационно-коммуникационными технологиями (ИКТ). Постепенно ИКТ проникают и в сферу образования: ИКТ-компетенции становятся одной из обязательных характеристик для ресурсов рынка труда.

Для их использования в процессе обучения в распоряжении преподавателя имеются многочисленные возможности применения в процессе обучения средств ИКТ – это информация из сети Интернет, электронные учебники, словари и справочники, презентации, программы, различные виды коммуникации – чаты, форумы, блоги, электронная почта, телеконференции, вебинары и многое другое [1]. Благодаря этому, происходит быстрый обмен информацией между участниками образовательного процесса, в результате чего актуализируется содержание обучения и тщательный отбор информационных ресурсов. При этом преподаватель не только образует, развивает студентов, но и активизирует мыслительные способности обучающихся; привлекает к работе пассивных студентов; обеспечивает учебный процесс современными материалами; приучение обучающихся к самостоятельной работе с различными источниками информации и т. д.

В сети Интернет, размещаются информационные материалы, созданные пользователями различного уровня: от студентов до профессионалов с многолетним стажем или научных сотрудников – и руководствоваться различными целями, как образовательными, так и развлекательными или коммуникативными. Готовые проекты, рефераты, доклады и решения задач, заимствованные из сети Интернет, стали сегодня уже привычным фактом, не способствующим повышению эффективности обучения и воспитания, а представляют собой лишь экономию сил и времени.

В связи со спецификой дисциплин из множества классификаций сервисов только некоторые виды мы можем использовать в своей практике. Это могут быть виртуальные доски, графические редакторы, презентации, публикации, видео-ролики, офисные технологии, видео-уроки, мастер-классы, библиотеки, образовательные видео, сайты, тесты, опросники, мультимедиа сервисы, дидактические игры и занятия [2].

Большую помощь при подготовке и проведении учебных занятий оказывает преподавателю пакет Microsoft Office, который включает в себя кроме известного всем текстового процессора Word еще и электронные презентации Microsoft Power Point.

Электронные презентации дают возможность преподавателю при минимальной подготовке и незначительных затратах времени подготовить наглядность к занятию.

Одним из электронных средств обучения является сайт LearningApps.org – это приложение Web 2.0 для поддержки обучения и процесса преподавания с помощью интерактивных модулей (приложений и упражнений) [1].

Целью данного приложения является собрание интерактивных блоков и возможность сделать их общедоступным. Такие блоки (так называемые приложения или упражнения) не включены по этой причине ни в какие программы или конкретные сценарии. Первоначально создается виртуальный класс (группа) зарегистрированных обучающихся.

Им предлагался выбор из общей базы списка упражнений по темам, в данном контексте рассматривается дисциплина «Конструкции и режимы электрических сетей (КИРЭС)» см. рисунок 1.

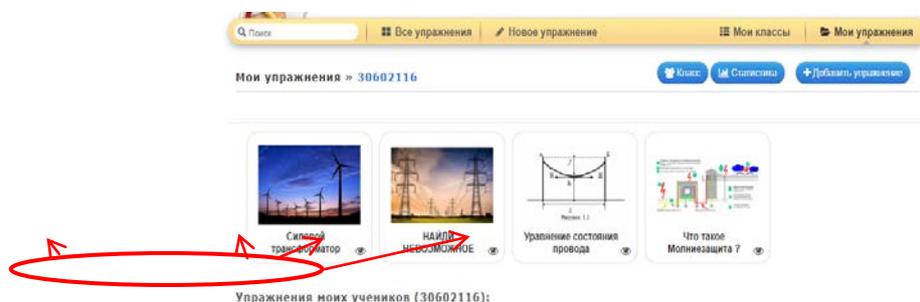


Рис. 1. Список упражнений по дисциплине «КИРЭС»

Созданные задания можно использовать на учебных занятиях для всей группы через интерактивную доску или с использованием изображения на экране с помощью проектора, а также как индивидуальное задание с использованием персонального компьютера или другого мобильного устройства. Для каждого задания задается название упражнения, рекомендации к заданию, формулировка самого задания, текст, который будет появляться, когда выполнено правильно; подсказки в виде помощи обучающемуся, как решить упражнение (появляются при нажатии на кнопку «Помощи»). На примере (рисунок 2) приведено упражнение «Найти пару – Устройства воздушных линий и оборудование электрических подстанций» на соотнесение объектов с их определением: необходимо соединить слова (конструкции линий и подстанций) и их изображения.

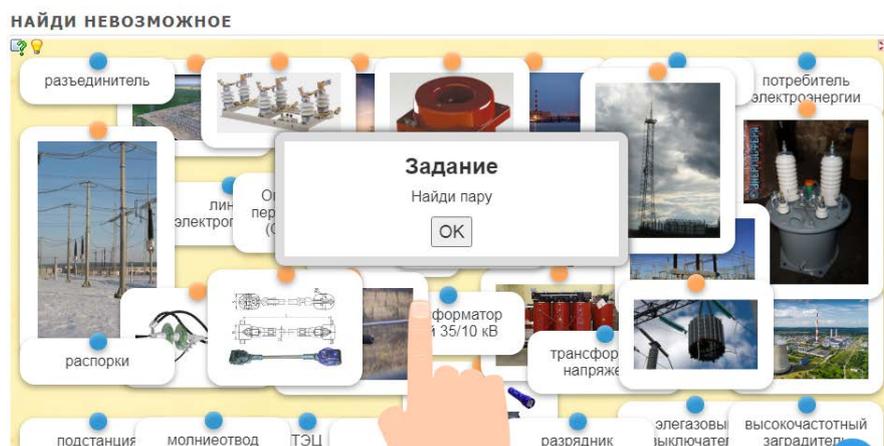


Рис. 2. Упражнение «Найти пару – Устройства воздушных линий и оборудование электрических подстанций»

Упражнение, созданное по шаблону «Заполнить пропуски – Габариты воздушных линий электропередач» предполагает заполнение пропусков в тексте путем ввода необходимых ключевых слов. Задание «Викторина с правом выбора ответа», требующее выбора из предложенных вариантов ответов правильных категорий «Что такое молниезащита?», способствует развитию критического мышления. Тематический «Кроссворд – Силовой трансформатор» составлен по разделу «Назначение и устройство электрических подстанций»

для проверки усвоения программного материала: силовые трансформаторы, их устройство и принцип работы. Имеется возможность отследить, какие упражнения, когда и за какое время были выполнены студентами в онлайн-режиме в виде статистики выполненных заданий.

Несомненно, реализация таких занятий потребует иной подготовки как студентов, так и преподавателей к проведению данных занятий. Следует сделать вывод, что ИКТ – действительно инструмент, позволяющий реализовывать право студента на образование удаленно, совершенствует систему образования, но и выполняет имиджевую функцию университетов.

Литература

1. Богачева, И.В. Мастер-класс как форма повышения профессионального мастерства педагогов : метод. рекомендации / И.В. Богачева, И.В. Федоров ; ГУО «Акад. последиплом. образования». – Минск, 2012.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Грайцевич Е.Г., Гецман Е.М.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Дано определение понятия «распределенная генерация», обоснована актуальность и особенности ее применения в условиях Республики Беларусь.

Текст доклада:

Снижение затрат на процессы выработки и передачи электроэнергии, ее хранение и потребление является одной из главных задач повышения эффективности функционирования современной распределительной сети. Прогресс развития современной энергетики базируется на концепции распределенной генерации. В широком смысле распределенная генерация понимается как производство электрической энергии генераторами малой мощности на уровне распределительной сети [1], но детальное содержание данного понятия остается дискуссионным.

В нашей стране актуально использование распределительных электрических систем на основе газотурбинных и газопоршневых электростанций (мини-ТЭЦ). Они имеют ряд достоинств в сравнении с электростанциями, ориентированными на централизованную передачу энергии: расположение генераторных установок непосредственно в зоне потребления энергии; относительно малые капиталовложения и сроки строительства станции, что обеспечивает сравнительно небольшой период окупаемости; возможность для выработки как электрической, так и тепловой энергии; высокий КПД.

Одной из основных причин строительства собственных генераторных установок и объектов распределенной генерации является необходимость оптимального резервирования электроснабжения важнейших потребителей на период максимальной нагрузки энергосети и при аварийных ситуациях в электроэнергетической системе. Благодаря этому появляется возможность интеграции интеллектуальных автоматических систем с достаточной самодиагностикой, предупреждением о сбоях в работе, развитием технологий самовосстановления схем электроснабжения потребителей, что снижает вероятность человеческого фактора и повышает надежность и эффективность электроэнергетической системы в целом.

Известными в настоящее время ключевыми направлениями, связанными с решением оптимизации сети, являются концепции: «интеллектуальной» активно-адаптивной сети (Smart Grid) [2], «интеллектуальных» измерений (Smart Metering) [3], Интернета вещей (Internet of Things) [4]. Их элементы получают свое развитие в силовом оборудовании, терминалах релейных защит и автоматики, устройствах связи и коммуникации от различных российских и мировых производителей. Общим для всех моделей оптимизации являются средства снижения потерь мощности и уменьшения капитальных затрат, а также меры по техническому и информационному перевооружению сетей напряжением 6 кВ, 10 кВ, 20 кВ и 35 кВ. В них начинают применяться современная коммутационная аппаратура и автоматизированные релоузеры, микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики с дискретными сигналами, установки распределенной генерации (РГ) и накопители электрической энергии и т. д.

В будущем энергетическая система должна будет иметь как крупные источники генерации, так и источники распределенной генерации на основе малых и возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Необходимо отметить, что при планировании развития использования ВИЭ, для обеспечения надежности энергоснабжения потребителей электроэнергии, обяза-

тельным условием является наличие источника, мощностью которого можно варьировать, и тем самым решать задачи, которые без подобных источников были бы просто нереализуемы.

В свою очередь полный переход к системам распределенной генерации нерационален и невозможен по ряду причин. Во-первых, большинство потребителей обеспечиваются существующей структурой и отказ от нее будет означать необходимость строительства огромного количества установок распределенной генерации и систем управления. Во-вторых, потребуются решать вопросы о надежности в снабжении потребителей.

Литература

1. Беляев Л.С. Энергетика XXI века: условия развития, технологии, прогнозы Л.С. Беляев, А.В. Лагереv, В.В. Посекалин; отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2004. – 386 с.
2. Кобец, Б.Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б.Б. Кобец, И.О Волкова. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
3. Нестеров, И.М. Smart Metering в концепции Smart Grid [Электронный ресурс]/ И.М. Нестеров // Фонд ЦСР «Северо-Запад»: [сайт]. URL: http://www.csmw.ru/files/csr/file_content_1316.pdf (дата обращения: 12.11.2020).
4. Пинчук, А., Концепция «Интернет вещей»: две актуальные задачи реализации / А. Пинчук, С. Мальцев, Н. Соколов, В. Фрейнкман // Перваямиля. – 2016. – № 8. – С. 56–65.

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Короткевич М.А., Дашковский А.А.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Цель данного доклада – определить допустимую токовую нагрузку для силовых электрических кабелей при помощи программных средств ЭВМ.

Текст доклада:

Городские электрические сети, питающие коммунально-бытовых и промышленных потребителей, выполнены в основном кабельными линиями с бумажно-масляной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена. В процессе эксплуатации токоведущие жилы нагреваются из-за потерь активной мощности в кабеле. Допустимая температура нагрева не должна превышать установленных правилами устройства электроустановок значений, для этого необходимо определить значения предельно допустимых токовых нагрузок кабелей, при которых изоляция не будет подвергаться ускоренному старению или снижению механической прочности и эластичности. Допустимая токовая нагрузка может быть определена по методике расчета, приведенной в [1].

Расчет допустимой токовой нагрузки без использования ЭВМ – весьма затруднительно и сопровождается погрешностями. В связи с этим была поставлена задача разработки программного средства, позволяющего без значительных затрат труда производить расчет технических характеристик кабеля (в частности допустимого тока нагрузки). Для этого сформулированы основные функциональные требования к программному средству: разработка базы данных, обеспечивающей хранение параметров кабелей; разработка сервиса, обеспечивающего выполнение функций администратора, в которые входят добавление, редактирование, удаление кабелей, производимых на заводе изготовителе, расчет их основных технических характеристик; разработка сервиса, обеспечивающего выполнение функций пользователя, а именно: выбор и сохранение намечаемых проектом кабелей из каталога. Программное средство осуществляет расчет активного сопротивления жил кабеля, реактивного сопротивления экрана кабеля, потерь мощности в экране и броне, термического сопротивления кабеля, диэлектрических потерь кабеля, а также допустимых токов нагрузки. В расчете учитываются различные условия прокладки, что позволит обосновано произвести выбор площади поперечного сечения кабеля на стадии проектирования.

Разработанное программное средство может быть использовано в проектных организациях, а также в учреждениях высшего образования для студентов энергетических специальностей.

Литература

1. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнение для расчета номинальной токовой нагрузки (100 % коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 25 с.

АДАПТИВНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ИСТОЧНИКА С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

Новиков С.О., Новикова Л.И., Титко В.Ю.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Автоматическая частотная разгрузка (АЧР) является основной автоматикой на любой электрической станции в энергосистеме, к ней предъявляется ряд условий и требований, при этом большая часть устройств АЧР и автоматического частотного деления (АЧД) устарели и не удовлетворяют требованиям действующих ТНПА.

Текст доклада:

АЧД, согласно действующих ТНПА следует устанавливать на всех ТЭС мощностью свыше 25 МВт. В таком случае отделение электростанций от энергосистемы при системных авариях предотвратит полное отключение потребителей, а АЧР помогает сохранить значение частоты на требуемом уровне.

Регулирующий эффект нагрузки зависит от состава потребителей, поэтому в различных энергосистемах он имеет свое значение и лежит в пределах $k_n = 1,0 - 3,0$. В течение суток состав потребителей меняется, вследствие чего регулирующий эффект нагрузки k_n также меняется. При действии АЧР величину и динамику снижения частоты в основном определяет плотность разгрузки и регулирующий эффект нагрузки.

Структурная схема агрегата, используемого в энергосистеме для регулировки небаланса мощности, показана на рисунке 1.

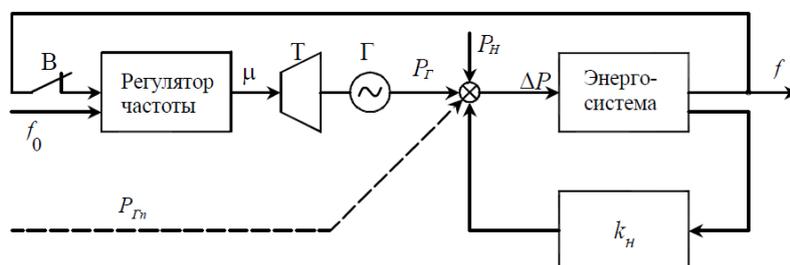


Рис. 1. Структурная схема для регулировки небаланса мощности

Регулятор частоты вращения реагирует на отклонение частоты от номинальной и воздействует на турбину. Мощность турбоагрегата уравнивается нагрузкой P_n .

При воздействии небаланса мощности ΔP изменение частоты во времени определяется выражением:

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{k_n} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right).$$

Если небаланс мощности $\Delta P < 0$, то частота снижается по экспоненциальному закону на величину $\Delta f_{уст} = \Delta P / k_n$ и в установившемся режиме будет равна $f_{уст} = 50 - \Delta f_{уст}$. Процесс снижения частоты показан в виде кривой «3» на рисунке 2.

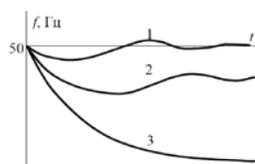


Рис. 2. Структурная схема агрегата при $P_r = \text{const}$

Если условится, что состав потребителей известен, тогда изменение состава нагрузки узла (потребителей) приводит к изменению регулирующего эффекта нагрузки, что в свою очередь даст возможность положительного регулирования (восстановления) частоты в режиме избытка и нехватки генерирующих мощностей, за счет обратной связи. Данный процесс саморегулирования не приведет к восстановлению частоты до номинального значения, а лишь позволит сохранять частоту рассматриваемой системы на более высоком уровне, и улучшит переходной процесс снижения частоты.

Авторами рассматривался вопрос изменения регулирующего эффекта нагрузки при работе автоматического частотного деления и при дефиците мощности, который компенсировался воздействием на турбины генерирующих источников в зависимости от частоты на шинах станции.

В момент времени « t_0 » система в равновесии и частота равна 50 Гц, в течении времени происходит ступенчатое изменение нагрузки во времени « t_n » и мощность потребления растет. Приняв, что у генерирующих источников нет запаса по мощности, частота в рассматриваемом узле начинает снижаться. В разрезе времени происходит изменение регулирующего эффекта нагрузки в зависимости от нагрузки потребителей.

Постоянная времени энергосистемы 8 с, период рассмотрения процесса 11 секунд, ступень изменения мощности 1 секунда, изменения регулирующего эффекта нагрузки на 1 МВт изменения мощности равен $\Delta k_n = 0,05$.

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Расчета режима при дефиците мощности и «хаотичном» изменении нагрузки потребителей

Нагрузка потребителей, МВт	Дефицит, МВт	Регулирующий эффект нагрузки k_n (для выборки)	Постоянная времени энергосистемы с учетом регулирующего эффекта нагрузки $T'j$	t, с	Выбор требуемого k_n , зависящего от нагрузки	Изменение частоты M , Гц	f , Гц
20	0	2	4	1	2	0	50
22	2	2,05	3,721	2	2,15	0,366	49,634
24,5	4,5	2,1	3,556	3	2,25	1,055	48,945
28,8	8,8	2,15	3,265	4	2,45	2,270	47,730
25,9	5,9	2,2	3,478	5	2,3	1,830	48,170
23,65	3,65	2,25	3,636	6	2,2	1,289	48,711
21	1	2,3	3,810	7	2,1	0,393	49,607
22,1	2,1	2,35	3,721	8	2,15	0,845	49,155
24,5	4,5	2,4	3,556	9	2,25	1,789	48,211
29,7	9,7	2,45	3,200	10	2,5	3,562	46,438
26,9	6,9	2,5	3,404	11	2,35	2,748	47,252

Мощность генерирующего источника, МВт	Постоянная времени энергосистемы T_i						
20	8						

При расчете режима в зависимости от суммарной мощности потребителей производилась выборка требуемого регулирующего эффекта нагрузки, и расчет частоты в данный момент времени с соответствующим коэффициентом.

Далее произведен расчета системы с постоянным коэффициентом и идентичными дефицитами мощности на всем промежутке времени. Результаты расчетов приведены в таблицу 2.

Таблица 2. – Расчета режима при дефиците мощности и $k_H=2$

Дефицит, МВт	Регулирующий эффект нагрузки k_H	Постоянная времени энергосистемы с учетом регулирующего эффекта нагрузки T_j	t , с	Изменение частоты Δf при $k_H = 2$, Гц	f при $k_H=2$, Гц	Частота f с $k_H \text{ var}$, Гц	f с экспоненциальным снижением частоты, Гц
0	2	4	1	0	50	50	50
2	2		2	0,393	49,607	49,634	48,623
4,5	2		3	1,187	48,813	48,945	48,153
8,8	2		4	2,781	47,219	47,730	47,788
5,9	2		5	2,105	47,895	48,170	47,503
3,65	2		6	1,418	48,582	48,711	47,281
1	2		7	0,413	49,587	49,607	47,108
2,1	2		8	0,908	49,092	49,155	46,974
4,5	2		9	2,013	47,987	48,211	46,869
9,7	2		10	4,452	45,548	46,438	46,787
6,9	2		11	3,229	46,771	47,252	46,724

Графики переходного процесса приведены на рисунках 3 и 4.

Анализируя данные можно заметить, что наибольшее значение снижения частоты происходит на 10 секунде, дефицит в этот момент времени составляет 9,7 МВт.

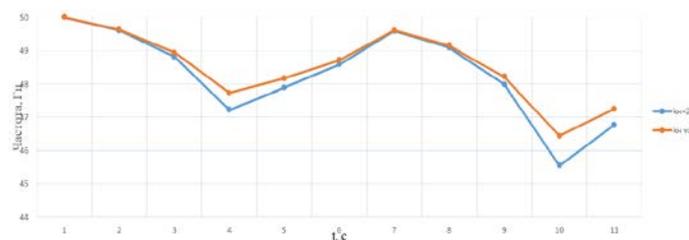


Рис. 3. Переходной процесс при изменяющемся k_H

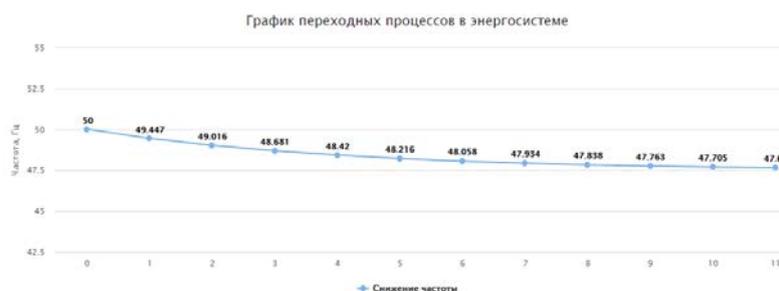


Рис. 4. Переходной процесс при дефиците $\Delta P = 5$ МВт в ПА АЧД

Сравнивая показатели системы с динамически изменяющимся коэффициентом k_n можно более стабильно и плавно производить регулирования частоты.

Литература

1. Правила технического обслуживания устройств релейной защиты, электроавтоматики, дистанционного управления и сигнализации электростанций и подстанций 110–750 кВ : СТП 09110.35.677-07. – Введ. 01.11.2007. – Минск : Белэнергоремналадка, 2007. – 136 с.
2. Цифровые устройства частотной разгрузки / А.Ф. Александров [и др.]; НТФ Энергопрогресс. – М., 2005. – 80 с.
3. Противоаварийная автоматика. Автоматическая частотная разгрузка [Электронный ресурс]. Режим доступа : titko-vadim.surge.sh. – Дата доступа : 17.12.2019.
УДК 621.311

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕРМИНАЛА ДЕЛИТЕЛЬНОЙ АВТОМАТИКИ МИНИ-ТЭЦ

Петрашевич Н.С.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Современная энергосистема Республики Беларусь включает в себя большое количество установок местной генерации, таких как газопоршневые мини-ТЭЦ промышленных предприятий. Такие мини-ТЭЦ работают синхронно с энергосистемой и для предотвращения развития аварийных ситуаций снабжены различными защитами от асинхронного хода.

Текст доклада:

Одним из вариантов защиты является делительная автоматика, принцип работы которой основан на скачке угла вектора напряжения. При возникновении короткого замыкания в системе форма синусоиды выходного напряжения изменяется. Ниже представлена осциллограмма фазных напряжений при удаленном двухфазном на землю коротком замыкании (рисунок 1).

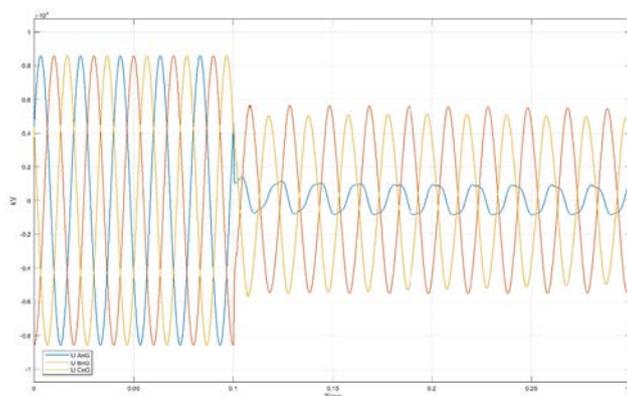


Рис. 1. Осциллограмма фазных напряжений при удаленном двухфазном на землю коротком замыкании

В нормальном режиме генератор работает синхронно с энергосистемой. При прохождении мгновенного значения через ноль, автоматика измеряет период напряжения. Далее данный период сравнивается с эталонным значением (соответствующим синхронной работе генератора). При потере связи с системой происходит ускорение или торможение генератора. Нулевое значение достигается раньше или позже эталонного на величину. По синхронной скорости и времени определяется угол, на который произошел скачок напряжения. Если скачок угла вектора напряжения превышает заданное значение, автоматика срабатывает без выдержки времени.

В соответствии с вышесказанным, в среде MATLAB был разработано программное обеспечение для анализа работы терминалов делительной автоматики, позволяющее определить скачок угла вектора напряжения мини-ТЭЦ (рисунок 2).

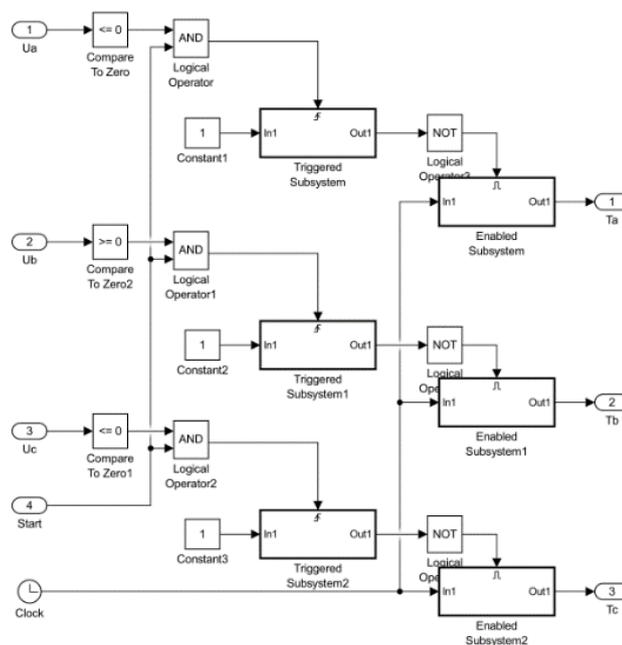


Рис. 2. Блок определения времени перехода синусоиды фазного напряжения через ноль

Используя разработанное программное обеспечение возможно моделировать различные варианты развития аварийных ситуаций и анализировать эффективность работы делительной автоматики газопоршневых мини-ТЭЦ.

Литература

1. Калентионок Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.
2. Калентионок, Е.В. Основы противоаварийного управления в энергосистемах [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» / Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Электрические системы» ; Е.В. Калентионок, Ю.Д. Филипчик. – Минск : БНТУ, 2018.

ПРИМЕНЕНИЕ МАЛЫХ ИСТОЧНИКОВ ГЕНЕРАЦИИ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Попкова Н.А., Секацкий Д.А.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Применение небольших энергетических источников мощностью до 25 МВт стало своеобразным трендом развития зарубежных энергетических систем. В Республике Беларусь доля малой генерации также растет, однако рост ее объема в доле энергетических источников белорусской энергосистемы пока что незначителен. Малые источники электроэнергии обладают рядом преимуществ, которые позволяют решать различные проблемы сложных электроэнергетических систем.

Текст доклада:

Электроэнергетическая отрасль пронизывает все сферы национального хозяйства и динамика ее развития непосредственно предопределяет развитие промышленности страны. Энергетика Республики Беларусь характеризуется дефицитом собственных энергетических ресурсов, что ставит под вопрос энергетическую безопасность нашей страны. За последние годы в электроэнергетики Республики Беларусь произошли радикальные изменения, так были приняты меры по стимулированию использования местных видов топлива и диверсификации структуры топливно-энергетических ресурсов. Теперь в нашей стране появилось несколько электрических станций, полностью работающих на возобновляемых источниках энергии, крупная атомная электрическая станция и понимание того, что белорусская энергосистема нуждается в дальнейшей модернизации.

Использование источников малой мощности, до 25 МВт, активно стимулируется в Финляндии, США, Великобритании, Испании и Дании. В последней, доля источников малой распределенной генерации достигает 50 %, что является следствием государственной политики, проводимой регуляторами Дании [1, с. 14].

Опыт отдельных стран указывает на целесообразность ухода от крупной централизованной энергетической системе к децентрализованной системе, где крупные энергетические источники заменяются несколькими источниками, с меньшей установленной мощностью, в случае тепловых электрических станций, подобная замена уменьшает суммарные затраты на модернизацию энергетики до 30 %. Еще одним преимуществом использования источников малой генерации в роли распределенной генерации, позволяют снизить относительные потери электроэнергии в сети.

Существуют типовые сценария использования объектов малой генерации, к ним можно отнести: аварийное электроснабжение различных объектов; электроснабжение потребителей в удаленных или труднодоступных районах; покрытие пиков графика нагрузок; повышение надежности работы распределительных сетей.

Объективная необходимость развития малой генерации в Республике Беларусь обусловлена несколькими ключевыми факторами:

- реализацией государственных программ, направленных на развитие местных возобновляемых источников энергии (местные источники энергии);
- реконструкцией изношенного генерирующего оборудования с дальнейшим преобразованием;
- создание розничного рынка электроэнергии и усилению конкуренции, что в дальнейшем приведет к снижению цен на данный товар.

При выборе автономного или централизованного источника электроснабжения наиболее выгодным является вариант, который наряду с надежным электроснабжением обладает

наименьшими приведенными затратами. Поэтому применение автономного источника электрической энергии целесообразно при выполнении условия (1):

$$E_n(K_1 + K_{TP}) + I_1 + I_{TP} + Ц_Э + Ц_П \geq E_n K_2 + I_1, \quad (1)$$

где E_n – норма доходности капитала; K_1 – капиталовложения в линии электропередачи (ЛЭП);

K_{TP} – капиталовложения в трансформаторную подстанцию (ТП);

I_1 – годовые эксплуатационные затраты на ЛЭП при централизованном электроснабжении;

I_{TP} – годовые эксплуатационные затраты на ТП;

$Ц_Э$ – стоимость приобретенной энергии от энергосистемы;

$Ц_П$ – стоимость годовых потерь электроэнергии при передаче от источника к потребителю;

K_2 – капиталовложения на автономную электростанцию;

I_2 – годовые эксплуатационные затраты на автономную электростанцию.

В настоящее время объекты малой распределенной генерации нуждаются в государственной поддержке, так как малая распределенная генерация находится в дискриминированном положении, относительно мощных энергетических источников. Важнейшим условием развития и существования малой энергетики является создание рыночных механизмов, их выход и функционирование на рынках электроэнергии и мощности, что отсутствуют в настоящее время [1, с.17].

Применение источников малой распределенной генерации в составе энергетической системы может приводит к следующим положительным изменениям:

– диверсификации топливно-энергетических ресурсов за счет применения местных видов топлива, и, следовательно, увеличении доли подобных ресурсов в балансе потребления страны;

– снижение объемов и стоимости потерь электрической энергии [2];

– уменьшение себестоимости продукции отдельных предприятий за счет использования собственной дешевой электроэнергии;

– малые энергетические источники на местных видах топлива позволяют экономить углеводородное сырье и снижать давление топливно-энергетического комплекса на окружающую среду.

С реализацией проектов, связанных с источниками малой распределенной генерации на местных видах топлива, должны быть заинтересованы, в первую очередь местные органы власти. Подобные технологии позволяют сэкономить не только углеводородное сырье, но и снизить себестоимость энергии.

Литература:

1. Попова, С.Н. Перспективы и ограничения развития распределенной энергетики на электроэнергетическом рынке России / С.Н. Попова, Н.В. Потехина // Общество: политика, экономика, право. – 2016. №12. – С. 93–95.

2. Фурсанов, М.И. Об управлении режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID / М.И. Фурсанов, А.А. Золотой // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2018. Т. 61, №1. – С. 15–27.

ТРАНСФОРМАТОРЫ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ОТВЕТВЛЕНИЙ БЕЗ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ТРАНСФОРМАТОРЫ С УСТРОЙСТВОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ

Романович Д.Г.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

В данном докладе приведено описание устройств переключения без возбуждения и регулирования под нагрузкой.

Текст доклада:

Переключение без возбуждения осуществляется при условии, если отсутствует ток в коммутируемой цепи и напряжения на всех обмотках трансформатора. Поэтому переключения при помощи устройства ПБВ не могут происходить часто.

Обмотки ПБВ выполняют со ступенями регулирования 2,5 % в диапазоне регулирования $\pm 5\%$.

Для осуществления переключения необходимо выполнить следующие действия:

1. Отключить трансформатор при помощи подстанционных выключателей и разъединителей.

2. Разблокировать фиксирующее устройство.

3. Переместить рукоятку в положение требуемого ответвления.

4. Установить фиксирующее устройство в первоначальное положение.

ПБВ применяют в следующих случаях:

– сезонное регулирование;

– при подключении новых нагрузок.

Место установки ПБВ на трансформаторах:

– на высшей стороне двухобмоточного трансформатора;

– на стороне среднего напряжения трехобмоточного трансформатора.

Регулировочные ответвления в схеме должны быть расположены таким образом, чтобы при отключении части витков обмотки, не происходило значительного увеличения поперечного магнитного поля, вызывающего снижение электродинамической прочности обмотки.

На рисунке 1 показана схема регулирования для трансформатора с ПБВ.

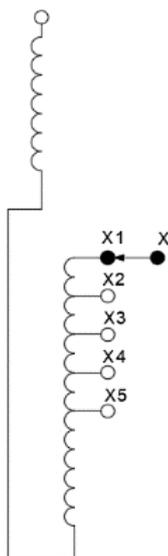


Рис. 1. Схема регулирования для трансформатора с ПБВ

При использовании устройства регулирования под нагрузкой изменение ответвлений можно производить без перерыва питания потребителей.

Трансформаторы с устройством РПН имеют ступени регулирования от 1,25 до 1,78 % с диапазонами регулирования от ± 10 до ± 16 %.

РПН применяется на трансформаторах:

- на высшей стороне трехобмоточного трансформатора;
- в нейтрали автотрансформатора;
- на высшей и средней сторонах автотрансформатора.

Две токоведущие цепи обязательное условие для работы устройства РПН. При работе устройства РПН не должно возникать положение, когда две цепи одновременно разомкнуты.

Также стоит упомянуть, что есть такое положение, при котором обе цепи замкнуты. Такое положение называется положением мост.

Чтобы не допустить возникновения короткого замыкания в цепи устанавливают токоограничивающие элементы.

В качестве токоограничивающих элементов применяются реактор или резистор.

При выборе величины сопротивления токоограничивающего элемента руководствуются тем, чтобы циркулирующий ток был 0,5–1,0 от номинального тока.

Коммутирование регулировочной системы происходит за счет избирателя. Избиратель имеет две и более контактные системы. Обычно переключение избирателя происходит в обесточенном состоянии.

Устройство РПН имеет контакторы, которые имеют также две контактные системы, предназначенные для предварительного обесточивания цепей контактов избирателя.

На рисунке 2 изображена схема устройства РПН с ограничителем тока в виде реактора.

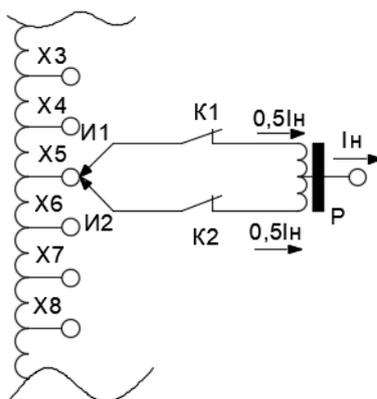


Рис. 2. Схема реакторного устройства РПН:

I1, I2 – контакты избирателя; K1, K2 – контакты контактора; P – реактор; I_n – ток нагрузки; X3...X8 – ответвления

Устройства РПН могут производиться без отдельного контактора, но процесс коммутации в них проводится под нагрузкой.

Электропривод приводит в действие устройство РПН.

Литература

1. Лизунова С.Д., Силовые трансформаторы: Справочная книга / С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: «Энергоиздат», 2004. – 616 с.
2. Поспелов Г.Е., Электрические системы и сети: Учебник / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, П.В. Лычев. – Минск :УП «Технопринт», 2004. – 720 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Старжинский А.Л.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Определены значения оптимальных КПД для воздушных линий электропередачи с учетом и без учета стоимости подстанционных устройств.

Текст доклада:

Площадь поперечного сечения проводов и номинальное напряжение относятся к основным параметрам линии электропередачи, определяющие уровень ее изоляции, механическую нагрузку на опоры, габариты линии и подстанций, их стоимость, а также потери мощности и энергии в них.

Коэффициент полезного действия (КПД) линии электропередачи показывает относительное значение потерь мощности или энергии при передаче электроэнергии. Коэффициент полезного действия по мощности характеризует мгновенное значение эффективности электропередачи, а по энергии – за определенный промежуток времени работы.

Таким образом, к основным параметрам линии электропередачи можно отнести (помимо номинального напряжения, площади поперечного сечения проводов) еще и КПД. Из названных параметров два любых можно рассматривать как независимые, определяющие значение третьего.

При проектировании параметры линии (номинальное напряжение, площадь поперечного сечения проводов) выбираются оптимальными на основе, например, минимума приведенных затрат. Соответствующий этим параметрам КПД можно считать параметром линии. Он определяет тот уровень потерь мощности, около которого они изменяются при управлении режимами.

Оптимальные параметры воздушной линии, соответствующие абсолютному минимуму приведенных затрат можно получить, решив совместно уравнения относительно оптимального напряжения и КПД. При этом получим выражение для оптимального КПД без учета стоимости подстанционных устройств [1, 2]:

$$\eta_{\text{опт}} = \frac{1}{1 + \frac{P_{\text{max}} \rho \ell}{(U_{\text{опт}}^2 \cdot F_{\text{опт}} \cdot \cos^2 \phi)}} \quad (1)$$

Как видно из (1), оптимальные напряжения и сечение проводов электропередачи оказываются только функциями передаваемой мощности и не зависят от длины, т. к. минимизировались затраты только на ВЛ без учета стоимости конечных подстанций.

Характер изменения оптимального КПД линии электропередачи в зависимости от длины и передаваемой мощности определяется выражением (1). Максимальный КПД выгоден при передаче больших мощностей на короткие расстояния.

Производить оценку оптимального коэффициента полезного действия с учетом стоимости подстанционных устройств можно по выражению [3]:

$$\eta_{\text{опт}} = 1 - \frac{\sqrt{3} \rho j \ell}{U_{\text{ном опт}}} - \frac{\Delta P_m}{P} - \frac{\Delta P_k}{P}, \quad (2)$$

где ΔP_T , ΔP_K – потери мощности в трансформаторах и на корону (относительные потери в трансформаторах можно принять (0,5–1) % и на корону 0,5 % на 1000 км линии).

Оптимальное номинальное напряжение линии переменного тока [3]:

$$U_{\text{ном опт}} = \sqrt{\frac{P\ell}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(E_k + \alpha_{\text{ВЛ}}) \left(\frac{1,11 \cdot 10^4}{j} + \frac{1,2 \cdot 10^4 \pi}{E_{\text{доп.л}} k_{\text{исп}}} \right) + 3\rho j \tau \beta}{46,2(E_k + \alpha_{\text{об}}) + 0,62 \cdot 10^{-4} (E_k + \alpha_{\text{ВЛ}}) \cdot \ell}} \quad (3)$$

Тогда можно записать [3]:

$$\eta_{\text{опт}} = 1 - \sqrt{3} \rho j \ell \cdot \frac{1}{U_{\text{ном опт}}} - 0,01 - 0,63 \cdot 10^{-8} \ell \quad (4)$$

Подставляя в формулу (4) оптимальное напряжение из (3), произведем расчета оптимального КПД при различной длине линии и передаваемой мощности.

Результаты расчета зависимости оптимальных КПД от длины линии (с учетом стоимости оборудования подстанций) представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1. – Значение оптимальных КПД в зависимости от длины линии при различной передаваемой мощности с учетом стоимости оборудования подстанций

ℓ, км	Передаваемая мощность, МВт					
	P = 300	P = 350	P = 500	P = 1000	P = 1500	P = 2000
50	0,96	0,962	0,966	0,973	0,976	0,978
100	0,946	0,949	0,956	0,966	0,97	0,973
150	0,935	0,939	0,947	0,959	0,965	0,968
200	0,925	0,929	0,939	0,954	0,96	0,964
250	0,915	0,921	0,932	0,948	0,956	0,96
300	0,907	0,913	0,925	0,943	0,952	0,957
350	0,898	0,905	0,918	0,939	0,948	0,953
400	0,89	0,897	0,912	0,934	0,944	0,95
450	0,882	0,89	0,906	0,929	0,94	0,946
500	0,874	0,882	0,899	0,925	0,936	0,943

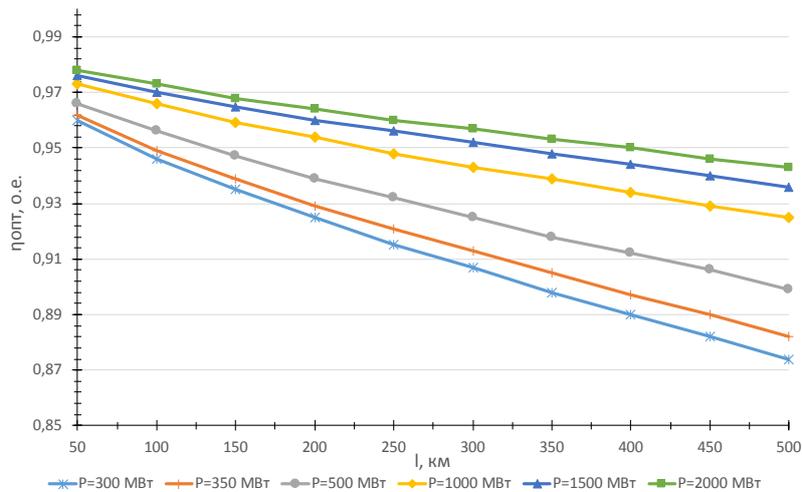


Рис. 1. Зависимости оптимального к.п.д. от длины линии при различной передаваемой мощности с учетом стоимости оборудования подстанции

Из формулы (3) следует, что при увеличении передаваемой мощности возрастает КПД электропередачи. Эта тенденция наглядно иллюстрируется на рисунке 1. При увеличении длины линии оптимальный КПД снижается. Отсюда следует вывод о нецелесообразности передачи относительно малых мощностей на большие расстояния.

Выводы:

Построены зависимости оптимального КПД воздушных линий напряжением 750 кВ от длины линии при различной передаваемой мощности с учетом стоимости оборудования подстанций.

Показано, что при увеличении передаваемой мощности возрастает к.п.д. электропередачи независимо от длины линии, а при увеличении длины линии оптимальный КПД снижается.

Литература

1. Шнелль, Р.В. Выбор основных параметров высоковольтных электропередач / Р.В. Шнелль, П.В. Воропаев, В.В. Картавец. – Воронеж: Издательство ВГУ, 1984. – 108 с.
2. Шнелль, Р.В. Оптимизация основных параметров электропередачи / Р.В. Шнелль, В.В. Картавец // Электричество. – 1982, №4. – С. 22–25.
3. Александров, Г.Н. Передача электрической энергии переменным током / Г.Н. Александров. – Л.: Энергоатомиздат. Ленигр. отд-ние, 1990. – 176 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УЧАСТКА ОДНОФАЗНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ВЛ (ВЛП)-10 КВ БЕЗ ЗАМЫКАНИЯ НА «ЗЕМЛЮ»

Фарино А.А

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

В докладе описан способ определения повреждения на ВЛ-10 кВ без однофазных замыканий.

Текст доклада:

Однофазные повреждения на воздушных электрических линиях напряжением 10 кВ без замыкания на «землю» происходят периодически в летние и зимние штормовые периоды, а также при срабатывании автоматики повторного включения (АПВ) при наличии междуфазных коротких замыканий на проводах ВЛ. Как правило, «слабым местом», данного вида повреждений, является связующий «шлейф» однофазного провода на сложных опорах 10 кВ с подвесной изоляцией. На практике данный вид повреждения влечет за собой несимметрию напряжения как в сети 10 кВ, так и в сети 0,4 кВ. Величина несимметрии напряжения в данном случае зависят от нагрузки потребителей. Для наглядности покажем усредненные значения несимметричных напряжений по стороне 0,4 кВ с обрыв провода на фазе С по стороне 10 кВ:

- $U_{a0} = 240\text{--}260$ В; – $U_{ав} = 390\text{--}400$ В (усредненные значения) .
- $U_{в0} = 140\text{--}160$ В; – $U_{вс} = 340\text{--}360$ В (усредненные значения).
- $U_{с0} = 40\text{--}90$ В; – $U_{са} = 140\text{--}160$ В (усредненные значения).

Полученная несимметрия напряжений является неоспоримым фактором нарушения качества и надежности электроснабжения потребителей:

- электроприемники с симметричной нагрузкой не запускаются;
- включенные ранее асинхронные двигатели работают неустойчиво;
- не работают бытовые и осветительные приборы на поврежденной фазе.

Проблема отыскания места повреждения усугубляется тем, что аппараты защит и сигнализации, установленные на питающих подстанциях, данный вид повреждений не чувствуют, а время отыскания места обрыва провода составляет 3–4 часа.

В современных распределительных сетях, оснащенных устройствами телеметрии, на базе измерительных преобразователей напряжений, установленных пофазно на стороне 0,4 кВ в каждой подстанции, предлагается в программном обеспечении автоматизированного рабочего места диспетчера РЭС создать дополнительную функцию, позволяющую учитывать сумму всех фазных напряжений по заданным параметрам величин вставок согласно формулы: $300 \text{ В} \leq U_{\Sigma} \leq 500 \text{ В}$.

При условии выполнения указанной формулы суммарных фазных напряжений, переданных устройствами телеметрии по каналам связи с одного, или ряда ТП, программа диспетчера РЭС за секунды формирует сигнал «Аварийная несимметрия напряжения», отображая участок повреждения на «мнемосхеме» сети с обрывом фазного провода без замыкания на «землю».

Данный способ позволяет минимизировать время поиска поврежденного участка электрической сети, повысить качество и надежность электроснабжения потребителей.

Поврежденный участок ВЛ 10 кВ за время переключений по ТУ можно локализовать путем переноса «точек разрывов» сети, а питание потребителей обеспечить по «резервным» линиям связи.

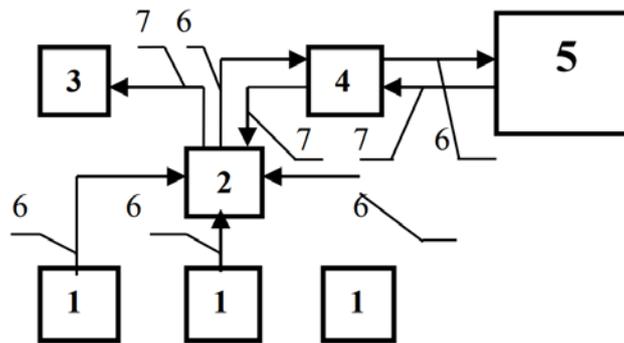


Рис.1. Блок-схема передачи данных «ТП – диспетчер РЭС».

1 – измерительные преобразователи напряжения; 2 – контроллер; 3 – вакуумный выключатель; 4 – GSM модем; 5 – автоматизированное рабочее место диспетчера РЭС; 6 – канал телеизмерений; 7 – канал телеуправления

Литература

1. Поспелов Г.Е., Федин В.Т., Лычев П.В. Электрические системы и сети: Учебник. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 720 с.
2. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. – М.: Энергоиздат, 1988. – 288 с.
3. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. – Ростов-н/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. – 720 с.
4. Мельников Н.А., Рокотян С.С., Шеренцис А.Н. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330–500 кВ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1974. – 472 с.
5. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.

О НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА В БНТУ

Ханевская В.А.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Обоснована актуальность энергетического менеджмента в Республике Беларусь (РБ), рассмотрено понятие «энергетический менеджмент» и необходимость его применения в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ).

Текст доклада:

В последние десятилетия активно поднимаются вопросы о перспективных направлениях развития энергетического менеджмента в РБ. Поэтому у нас совместно с законом РБ «Об энергосбережении» от 8 января 2015 года [1], Директивой Президента РБ «Экономия и бережливость – главные факторы энергетической безопасности государства» от 14 июня 2007 года [2] и Государственной программой «Энергосбережение» на 2016–2020 года [3] действует международный стандарт ISO 50001 [4]. В условиях современной экономики границы рынков стираются и понятие энергетического менеджмента приобрело распространение не только во всех отраслях промышленности, сельском хозяйстве, транспорте, но может быть применимо и к учреждениям образования.

Энергетический менеджмент – это система планирования, организации, мотивации, контроля, транспортировки, распределения и потребления топливно-энергетических ресурсов [5]. Данная система включает в себя мероприятия по энергосбережению, представляющую совокупность технических и организационных мероприятий, направленных на повышение эффективности использования энергоресурсов [6].

Энергетический менеджмент является неотъемлемой частью организации и структуры управления предприятием. Предприятия и организации, как частные, так и государственные, хотят получить долгосрочное экономическое преимущество путем создания эффективной системы менеджмента. И лишь сочетание управленческих и технических методов управления, а также их совокупность в энергетическом менеджменте дает оптимальный результат.

Применение энерго- и ресурсосберегающих мероприятий, использующиеся в учебных заведениях РБ, рассмотрим на самых простых примерах, например:

– в г. Орша в школе № 16 расположение школы соответствует направлению север и юг, при этом на северной части школы всегда меньше света и тепла, чем на южной стороне, где наоборот очень жарко и светло, поэтому приходилось открывать окна для поддержания рабочей температуры в классе. Заметим, что в данном случае совершенно не рационально используются энергоносители и происходит обогрев улицы. Однако после проведения соответствующих расчетов и внесенного предложения были установлены задвижки в теплопункте, для регулирования подачи тепла на разные стороны здания, что в результате привело к значительной экономии тепловой энергии, а в классах выровнялась температура воздуха до комфортной.

– в Осиновской школе Чаусского района Могилевской области нашли 2 способа экономии воды. Первоначально провели замену вентиляных смесителей на однорычажные, что привело к уменьшению расхода воды, за счет быстрой настройки оптимальной температуры в смесителе. Следующим шагом было привести в порядок сливные бачки в туалете с последующей заменой их на новые. Даже при замене половины сливных бачков на новые - кнопочные за год эффект экономии на воде составил 14 %. Еще одним простым решением явилось уменьшение уровня поплавка бочка, поэтому одним нажатием сливалось не 6–7 литров, а 5–6 литров и в этом случае за месяц экономия воды в школе составила на 9 % [7].

Казалось бы, такие простые решения, можно применить в любом учреждении при минимальных затратах, но даже их не всегда используют в качестве энергосберегающих мероприятий.

Для повышения энергоэффективности зданий и сооружений в БНТУ необходимо создание правильной управленческой системы, которая совместно с инженерными и техническими инновациями приведет к эффективному использованию энергетических ресурсов. Индивидуальная система энергетического менеджмента или отдельные ее элементы включают:

- организацию мониторинга потребления энергоресурсов в БНТУ;
- качественный анализ данных после проведенного мониторинга с выявлением существующих проблем;
- выявление решений и технико-экономических обоснований для возможности проведения мероприятий по повышению энергоэффективности;
- рациональный подход к мероприятиям в соответствии с их стоимостью и полученной экономией;
- привлечение инвестиций для реализации наиболее эффективных и выгодных мероприятий;
- подготовка долгосрочных энергетических и климатических планов для рационального использования энергоносителей на протяжении всего года;
- повышение уровня осведомленности сотрудников БНТУ и обучающихся в нем студентов.

Литература

1. Закон Республики Беларусь «Об энергосбережении» от 8 января 2015 г. № 239-З [Электронный ресурс] // Эталон-Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2020.
2. Директива Президента Республики Беларусь «Экономия и бережливость – главные факторы экономической безопасности государства» от 14 июня 2007 года № 3 [Электронный ресурс] // Эталон-Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2020
3. Государственная программа «Энергосбережение» на 2016–2020 годы: постановление Совета Министров Республики Беларусь № 248 [Электронный ресурс] //Эталон-Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2020
4. Энергоменеджмент, ISO 50001 и общий менеджмент. Мировой опыт и особенности внедрения [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/597/>. – Дата доступа: 12.11.2020
5. Бокун И.А. Основы энергосбережения / И.А. Бокун. – Минск: БНТУ, 2007. – 82 с.
6. Буренкин Д., Рак В. Рекомендации по энергоменеджменту, 2018. – 50 с.

ВЫБОР ЖЕСТКИХ ШИН РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Гапанюк С. Г., Лугачёв В. М.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Рассматриваются нормативные документы, которые регламентируют изготовление жестких шин из различных материалов. Приводятся критерии и аналитические соотношения для выбора жестких шин.

Текст доклада:

Электротехническая шина – это металлический проводник, как правило, из цветных металлов и их сплавов, обладающий высокой проводимостью. Жесткие шины применяются в закрытых распределительных устройствах в качестве сборных, которые служат для связи между собой отдельных ячеек и присоединения различных элементов, и ответвительных, применяемых для подвода электроэнергии, как составная часть троллейных систем в установках широкого диапазона номинальных напряжений.

Выбор шин осуществляется из определенного ряда, который регламентирован рядом технических нормативных актов. Перечислим наиболее важные и часто применяемые из них, рассмотрим их особенности, параметры, которые они регламентируют.

ГОСТ 15176-89 «Шины прессованные электрического назначения из алюминия и алюминиевых сплавов». Данный стандарт описывает геометрические размеры, особенности формы плоских алюминиевых шин, описывает варианты термообработки шин (закалка, различные виды старения).

ГОСТ 434-78 «Проволока прямоугольного сечения и шины медные для электрических целей». Технические условия. Данный ГОСТ, как и предыдущий, характеризует форму, геометрические размеры, массу 1 метра шины, длину, размеры бухт, марки меди допустимые для изготовления шин, допустимые дефекты поверхности, правила приемки и методы испытаний, но уже медных шин.

ГОСТ 8617-81 «Профили прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия». Данный ГОСТ регламентирует, геометрические параметры, форму стандартных профилей из алюминия, которые могут быть использованы в качестве шин.

ГОСТ 10434-82 «Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования». Данный ГОСТ классифицирует виды контактных соединений по назначению, климатическому исполнению. Указаны технические требования к соединениям, вид соединения в зависимости от назначения, требования к электрическим параметрам, механической прочности, надежности и безопасности. Требования к арматуре болтовых соединений, сварке.

При выборе жестких шин определяются следующие параметры: материал изготовления, сечение и форма.

При выборе материала изготовления шины руководствуются экономическими возможностями и техническими ограничениями. Шины из алюминия имеют относительно небольшой вес и достаточно низкую стоимость, а медные шины имеют высокую пластичность, коррозионная стойкость и могут, практически не теряя механических и электротехнических свойств, работать в более широком диапазоне температур.

Выбор площади поперечного сечения осуществляется по допустимому току из условий нагрева, по термической и динамической стойкости при воздействии токов к. з.

Следует отметить, что согласно [5] Проверке по экономической плотности тока не подлежат сборные шины электроустановок и ошиновка в пределах открытых и закрытых распределительных устройств всех напряжений.

Выбранные шины должны удовлетворять условиям нагрева. Расчет проводят при токах, больших чем штатные, т. е. при максимальных нагрузках в ремонтном или послеаварийном режиме.

$$I_{\max} \leq I_{\text{доп}},$$

где $I_{\text{доп}}$ – допустимый ток на шины выбранного сечения, с учетом поправки на температуру охлаждающей среды или варианта расположения шин, А. Он находится по следующей формуле:

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{доп.ном.}} \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{дл.доп}} - \vartheta_0}{\vartheta_{\text{дл.доп}} - \vartheta_{0\text{ном}}}} = I_{\text{доп.ном.}} \sqrt{\frac{70 - \vartheta_0}{45}} [\text{A}],$$

где $I_{\text{доп.ном.}}$ – допустимый ток при температуре окружающей среды; $\vartheta_{0\text{ном}} = 25$ °С (табличное значение, зависит от площади сечения и формы); $\vartheta_{\text{дл.доп}} = 70$ °С – для шин любого материала формы и сечения; ϑ_0 – действительная температура окружающей среды

При проверке шин на термическую стойкость, они должны соответствовать следующему условию:

$$\vartheta_k \leq \vartheta_{k.\text{доп}},$$

где ϑ_k – температура шин при нагреве током к.з.; $\vartheta_{k.\text{доп}}$ – допустимая температура нагрева шин при к.з.

Величину ϑ_k находят по графику из [6], исходя из величины f_k , которая описывает термическое состояние шины, а величина $\vartheta_{k.\text{доп}}$ является справочной величиной.

Металлические шины, закрепленные на изоляторах представляют собой динамическую колебательную систему на которую оказывают действие электродинамические силы, кроме того эта система имеет и собственную частоту колебаний. При к. з. могут возникнуть такие силы, составляющие которых будут изменяться с частотой 50 и 100 Гц. Таким образом, может возникнуть резонанс, что вызовет значительные дополнительные нагрузки на шины и изоляторы. Однако, резонанс не наступает, если собственные частоты колебаний менее 30 Гц или более 200 Гц. Частота собственных колебаний определяется по формуле:

$$f_0 = \frac{173,2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{q}} \quad \text{– для алюминиевых шин,}$$

$$f_0 = \frac{125,2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{q}} \quad \text{– для медных шин,}$$

где l – длина пролета между изоляторами, м; q – поперечное сечение шины, см²; J – момент инерции поперечного сечения шины относительно оси, перпендикулярной направлению изгибающей силы (зависит от формы шины, в таблицах приведены данные для его расчета, исходя из размеров шин, их формы и взаимного расположения), см⁴.

Изменяя длину пролета, стараются попасть в безрезонансный интервал, если это сделать не удастся, то проводят специальный расчет, учитывающий действия сил, возникающих при резонансных колебаниях.

Литература

1. ГОСТ 15176-89 «Шины прессованные электрического назначения из алюминия и алюминиевых сплавов».
2. ГОСТ 434-78 «Проволока прямоугольного сечения и шины медные для электрических целей. Технические условия».
3. ГОСТ 8617-81 «Профили прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия».
4. ГОСТ 10434-82 «Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования».
5. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.: ил..
6. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций: [учебник для энергетических и энргостроительных техникумов]/ Л.Д. Рожкова, В.С. Козулин. – 2-е изд., перераб.– Москва: энергия, 1980.

РАСЧЕТА УКРУПНЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТРОИТЕЛЬСТВА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4-10 КВ

Гапанюк С. Г.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Рассматриваются методы определения и утверждения стоимости строительства объектов электроснабжения. Предлагается разделить капитальные затраты на сооружение кабельной линии на составляющие, которые могут быть представлены функциями напряжения, сечения и условий прокладки кабеля.

Текст доклада:

Сегодня в Республике Беларусь стоимость строительства зданий и сооружений, в том числе сетей электроснабжения, которые могут быть как отдельным, так и одной из составляющих объекта строительства, определяется на основании смет проверка и утверждение которых осуществляется на основании [1] осуществляется госстройэкспертизой. Согласно постановления Совета Министров Республики Беларусь от 18 ноября 2011 г. № 1553 осуществляется переход к контрактной стоимости выполнения строительных, специальных, монтажных работ, в котором строительство объекта делиться на отдельные модули, а одним из методов ее определения стоимости остаются локальные сметы.

Составление локальной сметы достаточно трудоемкий процесс, который требует большого количества исходных данных и не всегда удобен при определении оценочной величины необходимых капиальных затрат и на основании анализа существующих расценок может быть заменен аппроксимирующие укрупненные показатели.

Данные коэффициенты аппроксимации путем позволят оценить капитальные затраты на сооружение как отдельных элементов в данном случае кабельных линий, так всего объекта целиком при условии замены локальные смет на укрупненные составляющие для всех остальных элементов входящих в состав проектно-сметной документации.

На стоимость строительства кабельной линии (КЛ) можно представить в виде суммы трех основных показателей:

$$K_{\text{КЛ}} = K_{\text{каб.}} + K_{\text{эмп}} + K_{\text{сооруж.}}$$

где $K_{\text{каб.}}$ – стоимость непосредственно кабеля и кабельных муфт;

$K_{\text{эмп}}$ – стоимость электромонтажных работ и сопутствующих материалов необходимых для сооружения кабельной линии, которая согласно [2], состоит из одного или нескольких кабелей с установленными на них соединительными и концевыми муфтами;

$K_{\text{сооруж.}}$ – стоимость работ и материалов необходимых для строительства необходимых сооружений для прокладки кабельной линии, к которым относятся трашеи, лотки, короба, закрытые გადახды и т. д.

Стоимость кабеля необходимого для строительства кабельной линии зависит от материала жил, сечения и количества жил, вида изоляции и количества кабелей в линии. Сюда же можно отнести стоимость кабельных муфт, количество и марка которых определяется выше указанными показателями самой кабельной линии.

Работы по прокладке кабеля и установке муфт рассчитываются исходя из его массы или массы отдельных кабелей в линии, стоимость установки муфт, в меньшей степени зависит от сечения кабеля и определяется в основном от номинальным напряжением линии.

Обе данных составляющих стоимости КЛ параметра при известной марке кабеля, которая определяется номинальным напряжением и условиями прокладки, могут быть представлены линейной функцией сечения кабеля.

Наиболее сложной для получения зависимости является третья составляющая, определение которой может быть осуществлено только после изучения условий размещения КЛ и выбора необходимых кабельных сооружений.

Литература

1. О государственной экспертизе градостроительной и проектной документации: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 30 сентября 2016 г. № 791// Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 07.10.2016 – 5/14142.

2. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР.- 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.: ил.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАГРУЗКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ПОНИЖАЮЩИХ ПОДСТАНЦИЙ С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Волков А.А.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Статические характеристики нагрузки (СХН) по напряжению, приведенные к различным узлам электрической сети, отличаются друг от друга.

Текст доклада:

Так, СХН, приведенные к стороне низкого напряжения (НН) центра питания (питающей подстанции напряжением 110/10 кВ), отличаются от СХН, приведенных к стороне низкого напряжения трансформаторных подстанций (ТП) 10/0,4 кВ, тем, что учитывают:

- 1) нагрузочные потери мощности в элементах электрической сети;
- 2) потери холостого хода в трансформаторах;
- 3) разные уровни напряжения в узлах разных ТП.

Цель работы состояла в определении СХН, приведенных к стороне высокого напряжения (ВН) центра питания (рисунок 1), с учетом и без учета действия автоматических регуляторов напряжения трансформаторов (АРНТ).

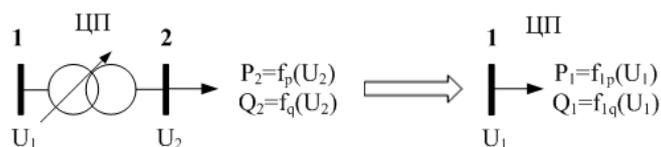


Рис. 1. Схема электрической сети

На рисунке 2 представлены зависимости отклонения напряжения на шинах НН ЦП при изменении отклонения напряжения на шинах ВН ЦП. Прямая линия а–б отражает зависимость при неизменном коэффициенте трансформации (без учета действия АРНТ), ломаная – зависимость при коэффициентах трансформации, обеспечивающих желаемое отклонение напряжения на шинах НН ЦП (с учетом действия АРНТ и зоны нечувствительности регулятора). Исходный режим (точка 1) принят при напряжении на шинах ВН 115 кВ. При увеличении напряжения на шинах ВН ЦП выбранное ответвление трансформатора $+1 \times 1,78\%$ обеспечивает допустимое отклонение напряжения на шинах НН ЦП до точки 2. Затем, для обеспечения требуемого отклонения напряжения на шинах НН ЦП, с определенной выдержкой времени происходит переключение ответвления на $+2 \times 1,78\%$ (переход с точки 2 в точку 3).

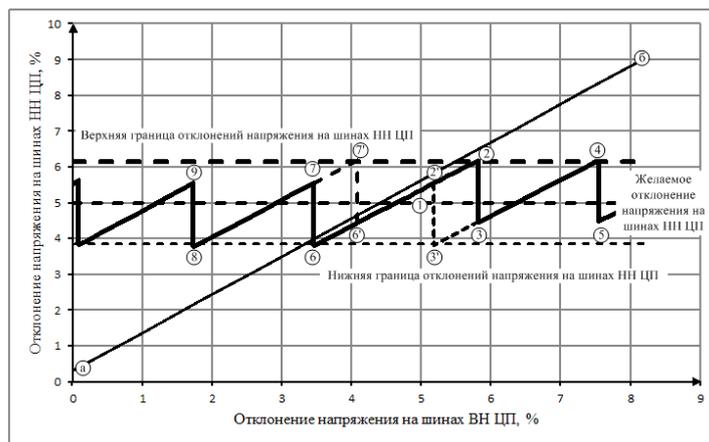


Рис. 2. Зависимости отклонения напряжения на шинах НН ЦП

На рисунке 3 представлены данные зависимости изменения отклонения напряжения на шинах ВН ЦП при использовании полного диапазона регулировочных ответвлений трансформатора.

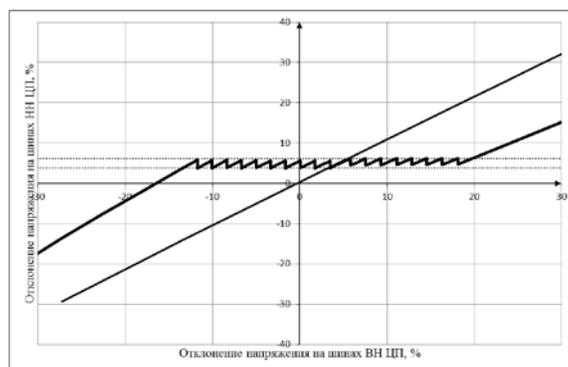


Рис. 3. Зависимости отклонения напряжения на шинах НН ЦП

Характеристики активной и реактивной мощности в узле 1 представлены на рисунке 4.

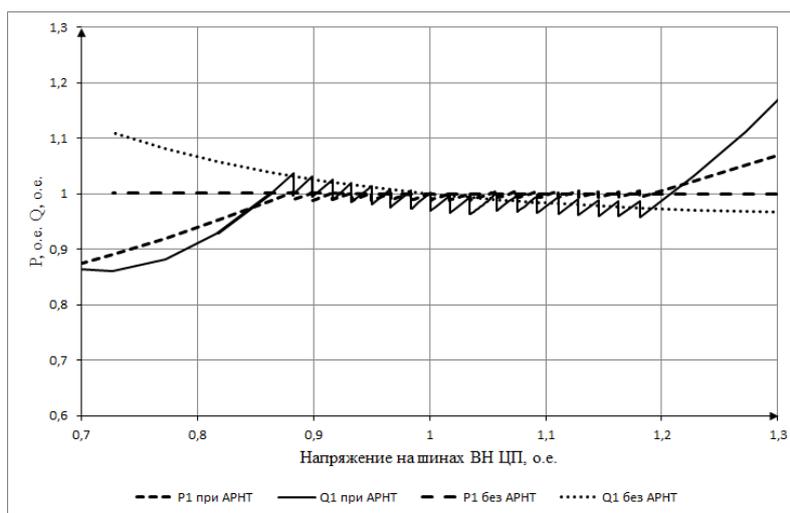


Рис. 4. Статические характеристики нагрузки по напряжению, приведенные к стороне ВН ЦП

Данные характеристики учитывают статические характеристики нагрузки, приведенные к стороне НН ЦП, изменение нагрузочных потерь активной и реактивной мощности в трансформаторе и потерь холостого хода.

Таким образом, автоматические регуляторы напряжения позволяют поддерживать требуемый уровень напряжения на шинах НН ЦП при достаточно широком диапазоне изменения напряжения на шинах ВН ЦП.

При автоматическом регулировании напряжения в центре питания в диапазоне регулировочных ответвлений активная мощность остается практически неизменной (колебания от 0,988 до 1,004 $P_{\text{ном}}$). Реактивная мощность изменяется в более широком диапазоне (изменения от 0,958 до 1,037 $Q_{\text{ном}}$).

При значительных снижениях или повышениях напряжения статические характеристики нагрузки по напряжению могут быть описаны полиномами второй степени, но коэффициенты полиномов при снижении и при повышении напряжения будут различны.

ВЕКТОРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА СТАТИКИ ГИБКИХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Бладыко Ю.В.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Для точного расчета механических напряжений и стрел провеса предложен векторно-параметрический метод расчета гибких проводов воздушных линий, где используется модель проводов в виде гибкой упругой нити с учетом пространственного расположения всех конструктивных элементов.

Текст доклада:

В основу разработанного векторно-параметрического метода механического расчета проводов положена модель в виде гибкой упругой нити [1, 2]. Механический расчет провода приводит к решению уравнений статики гибкой нити, составленных в векторно-параметрической форме $\bar{R}(s_0)$, где \bar{R} – радиус-вектор в системе координат x, y, z , а s_0 – дуговая координата, равная длине участка провода при нулевой температуре $t = 0$ и до растяжения. Они получаются из векторно-параметрических уравнений динамики гибкой нити, в которых производные по времени приняты нулевыми, и в матричной форме выглядят так:

$$\|W\| \cdot \left\| \frac{d^2 \bar{R}}{ds_0^2} \right\| = -\|P\|, \quad (1)$$

$$\|W\| = \begin{vmatrix} \lambda^2 + b^2 \left(\frac{dx}{ds_0} \right)^2 & b^2 \frac{dx}{ds_0} \cdot \frac{dy}{ds_0} & b^2 \frac{dx}{ds_0} \cdot \frac{dz}{ds_0} \\ b^2 \frac{dy}{ds_0} \cdot \frac{dx}{ds_0} & \lambda^2 + b^2 \left(\frac{dy}{ds_0} \right)^2 & b^2 \frac{dy}{ds_0} \cdot \frac{dz}{ds_0} \\ b^2 \frac{dz}{ds_0} \cdot \frac{dx}{ds_0} & b^2 \frac{dz}{ds_0} \cdot \frac{dy}{ds_0} & \lambda^2 + b^2 \left(\frac{dz}{ds_0} \right)^2 \end{vmatrix}; \quad \left\| \frac{d^2 \bar{R}}{ds_0^2} \right\| = \begin{vmatrix} \frac{d^2 x}{ds_0^2} \\ \frac{d^2 y}{ds_0^2} \\ \frac{d^2 z}{ds_0^2} \end{vmatrix}; \quad \|P\| = \begin{vmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{vmatrix}.$$

где p_x, p_y, p_z – проекции на оси координат вектора суммарной внешней распределенной нагрузки на единицу длины провода;

$$\lambda^2 = \frac{T}{1+e}; \quad b^2 = \frac{d^2 - \lambda^2}{(1+e)^2}; \quad d^2 = \frac{1}{\alpha_y(1+\alpha T)};$$

где T –тяжение по модулю;

e – относительное удлинение участка провода.

Величина s выражается через длину дуги s_0 до нагрева и растяжения, которая остается неизменной в различных режимах. При этом считается, что температурное удлинение провода и его растяжение происходят по линейному закону:

$$ds(T, t) = ds_0(1 + \alpha T)(1 + \alpha_y T), \quad (2)$$

где $ds(T, t)$ – длина элемента провода после растяжения и нагрева;

ds_0 – то же, до растяжения и нагрева при тяжении $T = 0$ и температуре $t = 0$;
Относительное удлинение элемента провода находится по выражению:

$$e = \frac{ds - ds_0}{ds_0} = \frac{ds}{ds_0} - 1. \quad (3)$$

Из него вытекает отношение:

$$\frac{ds}{ds_0} = 1 + e,$$

которое подставляется в (2). После этого из (2) получается выражение вида $T = f(e)$:

$$T = \frac{e - \alpha t}{\alpha_y (1 + \alpha t)}.$$

Относительное удлинение зависит от координат провода. Длина элемента ds выражается через проекции на оси координат вектора \bar{R} : $ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$

и подставляется в (3):

$$e = \sqrt{\left(\frac{dx}{ds_0}\right)^2 + \left(\frac{dy}{ds_0}\right)^2 + \left(\frac{dz}{ds_0}\right)^2} - 1.$$

В местах соединения гирлянд изоляторов, проводов, отпаек, заградительных шаров и распорок действуют сосредоточенные нагрузки. Уравнения статики элементов проводов, на которые действуют совместно распределенные и сосредоточенные нагрузки, находятся из уравнения

$$T \frac{d^2 \bar{R}}{ds^2} + \frac{dT}{ds} \frac{d\bar{R}}{ds} + \bar{q} + \frac{\bar{T}_o}{ds} + \frac{\bar{P}_c}{ds} = 0,$$

где T – тяжение проводов;

\bar{T}_o – вектор тяжения спусков в точках их крепления к проводам;

\bar{q} – суммарная распределенная нагрузка на провода;

\bar{P}_c – вес зажимов, коромысел, распорок, шаров и шлейфов.

Входящие в уравнение (1) проекции p_x , p_y и p_z представляют собой суммарные нагрузки:

$$\bar{p} = \bar{q} + \frac{\bar{T}_o + \bar{P}_c}{ds}.$$

Решение матричного уравнения (1) относительно матрицы старших производных имеет сводится к нахождению координат:

$$\left\| \frac{d^2 \bar{R}}{ds_0^2} \right\| = \|W\|^{-1} \cdot \|\bar{p}\|.$$

Значительно проще вид имеют уравнения статики гибкой нити с малой стрелой провеса:

$$\frac{H}{(1+e)^2} \cdot \frac{d^2 \bar{R}}{ds_0^2} + \bar{p} = 0.$$

Численное решение нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих статику гибкой упругой нити [1], производится разностным методом [3, 4]. Система из конечно-разностных уравнений решается на основе итераций, вложенных друг в друга: относительно координат, длины или тяжения провода. При наличии спусков к электрическим аппаратам добавляется еще одна итерация по координатам точек их крепления к гибким шинам. Эти координаты являются функцией тяжения в спуске, а оно в свою очередь зависит от положения провода.

Численный метод механического расчета гибких проводов, реализованный в одной из последних версий пакета компьютерных программ MR2.20, излагается в [4]. При его разработке учтены многочисленные предложения и замечания проектных организаций Беларуси и России, эксплуатирующих ранние версии пакета программ.

Расчеты [2, 5] выполнялись для грозозащитного троса с заградительными шарами при следующих исходных данных: длина пролета ВЛ $l = 400$ м, провод 264/34 АCSR с весом $q = 0,98$ даН/м сечением $F = 297,8$ мм², модулем упругости $E = 7400$ даН/мм², тяжение в пролете без сфер $H = 1490$ даН, суммарный вес шаров в пролете $P = 35$ даН. В исходном режиме без шаров задавалось тяжение провода (троса), затем в пролете крепились шары. Расчеты по всем методикам дают близкие результаты [4]. Наиболее схожие результаты дает представление провода цепной линией и использование двух слагаемых разложения в ряд при расчете стрел провеса. Представление провода параболой дает абсолютную погрешность в расчетах всего пару сантиметров. Тяжение провода при установке заградительных шаров рассчитывалось по уравнению состояния и совпадает с результатами расчета по программе MR2.20. Если известны значения составляющих сосредоточенных сил, то можно пользоваться принятой в проектной практике моделью провода в виде параболы.

Любое перемещение шаров вдоль пролета приводит к изменению тяжения и стрел провеса. При равномерной расстановке более семи шаров их вес можно равномерно распределять вдоль пролета. При этом абсолютная погрешность составляет около трех сантиметров. Сдвиг всех шаров к центру увеличивает стрелу провеса на 67 см (на 5,1 %). При действии гололедной и ветровой нагрузок, при снижении температуры, при увеличении любой сосредоточенной нагрузки погрешность в расчете стрел провеса будет расти, тяжение также может расти. В этом случае более точный результат дает компьютерная программа MR2.20, которая учитывает более точно составляющие от сосредоточенных сил по всех плоскостях.

Литература

1. Стрелюк, М.И. Численный метод расчета статики гибкой ошиновки ОРУ в различных режимах климатических воздействий / М.И. Стрелюк, И.И. Сергей, Ю.В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1983. № 8. С. 8–14.
2. Сергей, И.И. Механический расчета гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами / И.И. Сергей, Ю.В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2018. – Т. 61, № 4. – С. 299–309.
3. Streljuk M.I., Sergey I.I., Bladyko Y.V. Computer aided program of mechanical calculation of flexible conductors for substations and overhead lines design // New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial implementation: Proc. Int. Conf. Lublin Technical University. – Lublin (Poland), 7–8 Sept. 1995. – P. 15–19.
4. Стрелюк, М.И. Численный метод механического расчета гибких токопроводов электроустановок энергосистем / М.И. Стрелюк, И.И. Сергей, Ю.В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. – 1995. – № 3–4. – С. 21–29.
5. Сергей, И.И. Механический расчета гибких проводов с заградительными шарами / И.И. Сергей, Ю.В. Бладыко, М.В. Абраменко // Материалы 15-ой Международной НТК «Наука - образованию, производству, экономике» / Мн.: БНТУ, 2017. – Т.1. – С. 23.

МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТА ГИБКИХ ТОКОПРОВОДОВ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ

Бладыко Ю.В.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Приведен алгоритм расчета горизонтального отклонения гибкого провода и коэффициентов его увеличения при наличии горизонтальных сосредоточенных нагрузок, обусловленных действием ветра на распорки, заградительные шары, отпайки к электрическим аппаратам и другие конструктивные элементы распределительных устройств и воздушных линий. Выведены формулы расчета горизонтальной составляющей коэффициента нагрузки для решения уравнения состояния при наличии горизонтальных сосредоточенных сил, действующих в любых направлениях.

Текст доклада:

Задачей механического расчета гибких проводов распределительных устройств (РУ) и воздушных линий (ВЛ) является определение стрел провеса и тяжений в различных климатических режимах. В [1] выведены формулы для кривой провисания провода при наличии одной или нескольких сосредоточенной сил и различных натяжных гирляндах изоляторов в пролете. Получены формулы для нахождения расстояния до максимальной стрелы провеса. Выведены формулы расчета коэффициента нагрузки для решения уравнения состояния в случае разных гирлянд в пролете при одной и нескольких сосредоточенных силах. Достоверность формул доказана совпадением результатов для частного случая расположения гирлянд. Приводится алгоритм расчета стрел провеса при совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок, а также в случае расположения точек подвеса провода на разных высотах. Предложена формула для оценки коэффициента увеличения стрелы провеса, обусловленного наличием сосредоточенных сил, равномерно распределенных вдоль пролета, и разных гирлянд изоляторов в пролете.

Цель доклада – определение коэффициентов для расчета стрел провеса и тяжений при горизонтальных сосредоточенных нагрузках. Они появляются при действии ветра на конструктивные элементы РУ и ВЛ: распорки, заградительные шары, отпайки к электрическим аппаратам. При отсутствии ветра горизонтальные сосредоточенные нагрузки и, следовательно, отклонения возникают при некилевом расположении отпаяк.

Расчетаная схема горизонтальной проекции пролета представлена на рис. 1.

$$K_{fz} = \frac{1 + 2\delta_{z1} + 2\delta_{z2} + (\delta_{z1} - \delta_{z2})^2 + K_{Pz}(1 + 1/n)}{\cos \theta},$$

где $\delta_{z1} = (K_{z1} - 1)K_{r1}^2$; $\delta_{z2} = (K_{z2} - 1)K_{r2}^2$ – коэффициенты, учитывающие наличие первой и второй натяжных гирлянд изоляторов при действии на них ветровой нагрузки;

$K_{z1} = \frac{q_{z1}}{q_z}$; $K_{z2} = \frac{q_{z2}}{q_z}$ – кратности горизонтальных погонных нагрузок первой и второй натяжных гирлянд изоляторов относительно горизонтальной погонной нагрузки провода;

$K_{r1} = \frac{l_{r1} \cos \theta}{l}$; $K_{r2} = \frac{l_{r2} \cos \theta}{l}$ – кратности длин первой и второй натяжных гирлянд изоляторов относительно длины пролета;

$K_{Pz} = \frac{P_z \cos \theta}{q_z l}$ – коэффициент горизонтальных сосредоточенных сил;

$P_z = \sum_{i=1}^n P_{zi}$ – суммарная сила n горизонтальных сосредоточенных нагрузок;

θ – угол наклона пролета ($\text{tg} \theta = h/l$), h – разность высот подвеса проводов.

Максимальное горизонтальное отклонение в этом случае рассчитывается как:

$$z_0 = \frac{q_z K_{fz} l^2}{8H}, \quad (1)$$

где K_{fz} – коэффициент увеличения горизонтального отклонения;

H – горизонтальная проекция тяжения в проводе.

Коэффициент увеличения отклонения, обусловленный наличием натяжных гирлянд и горизонтальных сосредоточенных сил, определяется по выражению:

$$K_{fz} = \frac{8Hz_0}{q_z l^2}.$$

При отсутствии горизонтальных распределенных нагрузок ($q_z = 0$) лучше пользоваться формулой нахождения произведения $q_z K_{fz}$:

$$q_z K_{fz} = \frac{8Hz_0}{l^2}. \quad (2)$$

Результирующая стрела провеса в наклонной плоскости рассчитывается после нахождения составляющих в обеих плоскостях [5].

Длина эквивалентного провода (системы «первая натяжная гирлянда изоляторов – токопровод – вторая натяжная гирлянда изоляторов») определяется [1]:

$$L = l + \frac{l^2 l_1 [(q_y K_y)^2 + (q_z K_z)^2]}{24H^2} = l + \frac{D}{2H^2}, \quad (3)$$

где интеграл D рассчитывается как:

$$D = D_y + D_z; D_y = \frac{l^2 l_1 (q_y K_y)^2}{12}; D_z = \frac{l^2 l_1 (q_z K_z)^2}{12};$$

K_y, K_z – коэффициенты нагрузки, учитывающие конструктивные элементы для различных климатических нагрузок, определяемые для двух плоскостей как:

$$K_y^2 = \frac{12D_y}{q_y^2 l^2 l_1}; K_z^2 = \frac{12D_z}{q_z^2 l^2 l_1}.$$

При отсутствии горизонтальных распределенных нагрузок ($q_z = q_{zr1} = q_{zr2} = 0$) лучше пользоваться формулой нахождения произведения $q_z K_z$:

$$q_z K_z = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{12D_z}{l_1}}. \quad (4)$$

При известных конфигурациях приложения распределенных и сосредоточенных сил интеграл определяется в общем виде по формулам:

$$D_y = \int_0^l Q_y^2(x) dx, D_z = \int_0^l Q_z^2(x) dx,$$

где $Q_y(x)$, $Q_z(x)$ – балочные поперечные силы в вертикальной и горизонтальных плоскостях.

Литература

1. Бладыко, Ю.В. Механический расчета гибких токопроводов с сосредоточенными нагрузками / Ю.В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2020. – Т. 63, № 2. – С. 103-115.

ОПТИМИЗАЦИЯ С УТОЧНОГО РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В ПЕРИОД РЕМОНТНОЙ КАМПАНИИ

Александров О.И. – доцент БГТУ, Минск, Беларусь
Жуковская Т.Е. – ст. преподаватель БНТУ, Минск, Беларусь

Аннотация

Разработка эффективных методов повышения экономичности текущих режимов электроэнергетической системы (ЭЭС) приобретает особую актуальность в период массовых отключений основного оборудования во время проведения ремонтной кампании. Здесь приводятся постановка задачи и описание алгоритма оптимального планирования активных мощностей электростанций (ЭС) ЭЭС в период ремонтной кампании. *Алгоритм* составлен с учетом необходимых ограничений на допустимые расходы топлива на отдельных ЭС с использованием процедур *функциональной, временной и пространственной декомпозиций*.

Текст доклада:

Оптимизация выполняется по известной стратегии метода ветвей и границ, причем сам процесс нахождения оптимальных значений активных мощностей определяется на каждом уровне функциональной и режимной иерархии. Задача решается на двух уровнях иерархии: ЭС и ЭЭС – с использованием прогнозируемых величин активных и реактивных нагрузок узлов потребления, а также заданных значений предельно допустимых перетоков мощности по межсистемным связям. Для эффективного решения комплексной задачи оптимизации применяется метод пространственной декомпозиции, который позволяет снизить размерность задачи и дает приемлемое решение в условиях недостаточно определенной информации.

Метод дает возможность выполнять оперативную коррекцию оптимального режима ЭЭС при введении внеплановых искусственных ограничений, в том числе при дефиците топлива на отдельных ЭС.

Критерий оптимизации – суммарный расход топлива на ЭС с учетом пусковых расходов. Целевая функция минимизируется в замкнутой области, определяемой режимно-техническими ограничениями. Различные состояния агрегатов ЭС и ЭЭС характеризуются множеством кортежей с логическими переменными (0, 1 и 2), определяющими планируемые моменты включения, отключения и вывода оборудования в резерв (ремонт). Состояние возможных переходов каждой ЭС могут быть описаны в виде графа, вершины которого суть составы оборудования, а ветви – наличие самих переходов.

В *функциональном* аспекте в данной задаче выделяются две подзадачи: выбор оптимального состава включенных в работу агрегатов на электростанциях (нижний уровень иерархии) и определение оптимальных суточных графиков активных нагрузок станций (верхний уровень).

Задача выбора оптимальных составов генерирующего оборудования формулируется следующим образом:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^T [B_j(i_j(t), P_j(t)) + D_j(s_j(t-1), i_j(t))] \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$S(0) = \{s_j(0) \mid j = \overline{1, n}\}; \quad (2)$$

$$(i_j(t-1), i_j(t)) = (v, \mu), \quad v \in X_j, \quad (v, \mu) \in \Gamma_j^{(v)}; \quad (3)$$

$$y_{\nu\mu}(s_j(t-1), t) = 1, \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T};$$

$$\sum_{j=1}^n P_j(t) - P(t) - \pi(t) = 1, \quad t = \overline{1, T}; \quad (4)$$

$$P_j^{\min}(i_j(t)) \leq P_j(t) \leq P_j^{\max}(i_j(t)), \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T}; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n P_j^{\min}(i_j(t)) \leq (1-r_-)(P(t) + \pi(t)), \quad t = \overline{1, T}; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n P_j^{\max}(i_j(t)) \geq (1-r_+)(P(t) + \pi(t)), \quad t = \overline{1, T}; \quad (7)$$

Здесь $S(t) = \{s_j(0) \mid j = \overline{1, n}\}$, $t = \overline{0, T}$, – состояние ЭЭС, т. е. множество кортежей, характеризующих состояния агрегатов станций к t -му моменту времени;

$$S_j(t) = ((Z_j^{(1)}(t), \tau_j^{(1)}(t)), (Z_j^{(2)}(t), \tau_j^{(2)}(t)), \dots, (Z_j^{(n_j)}(t), \tau_j^{(n_j)}(t))), \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{0, T}; \quad (8)$$

$Z_j^k(t)$, $k = \overline{1, n_j}$, $j = \overline{1, n}$, $t = \overline{0, T}$ – логическая переменная, значения которой определяются как

$Z_j^k(t) = \begin{cases} 0, & k\text{-й агрегат } j\text{-й станции к } t\text{-му моменту времени отключен в ремонт;} \\ 1, & k\text{-й агрегат } j\text{-й станции к } t\text{-му моменту времени отключен в резерв;} \\ 2, & k\text{-й агрегат } j\text{-й станции к } t\text{-му моменту времени включен в работу;} \end{cases}$ $\tau_j^k(t)$ – планируемый момент окончания ремонта при $Z_j^k(t)=0$, либо момент отключения в резерв $\tau_j^k(t) < \theta^{(t)}$ при $Z_j^k(t)=1$, либо момент включения в работу $\tau_j^k(t) < \theta^{(t)}$ при $Z_j^k(t)=2$;

$$i_j(t) \in A = \{1, 2, \dots, m\}, \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{0, T},$$

где $m = \sum_{j=1}^n |x_j|$, – номер состава включенных в работу агрегатов на j -й станции к i -му моменту; (X_j, Γ_j) , $j = \overline{1, n}$, – граф переходов составов агрегатов на j -й станции, произвольный узел которого $v \in X_j, X_j \in A$, соответствует одному из возможных составов агрегатов, а ветвь $(v, \mu) \in \Gamma_j$ указывает на возможность непосредственного перехода в фиксированный момент времени из состава v в состав μ ; $\Gamma_j^{(v)} \subset \Gamma_j, v \in X_j, j = \overline{1, n}$, – множество ветвей графа (X_j, Γ_j) , выходящих из узла v ; $y_{\nu\mu}, v \in X_j, \mu \in X_j, (v, \mu) \in \Gamma_j, j = \overline{1, n}$ – логическая переменная, значения которой определяется как

$$y_{\nu\mu}(s_j(t-1), t) = \begin{cases} 1, & \text{переход от состава } v \text{ к составу } \mu \text{ возможен из состояния} \\ & s_j(t-1) \text{ в момент } t \text{ возможен;} \\ 0, & \text{переход от состава } v \text{ к составу } \mu \text{ из состояния} \\ & s_j(t-1) \text{ в момент } t \text{ невозможен, } t = \overline{1, T}, \end{cases}$$

$P_j(t)$, $j = \overline{1, n}$, $t = \overline{1, T}$ – мощность j -й станции на t -м интервале времени, т.е. интервале $[\theta^{(t-1)}, \theta^{(t)}]$; $P_j^{\min}(t)$, $P_j^{\max}(t)$, $j = \overline{1, n}$, $t = \overline{1, T}$, – технический минимум нагрузки и располагаемая мощность j -й станции при составе агрегатов $i_j(t)$; $P(t)$ – суммарная активная нагрузка ЭЭС с учетом перетоков по межсистемным связям; $\pi(t)$ – потери активной мощности в основной сети ЭЭС t -м интервале;

$D_j(s_j(t-1), i_j(t))$, $j = \overline{1, n}, t = \overline{1, T}$, – расход топлива на переход из состояния $s_j(t-1)$ к составу $i_j(t)$; $B_j(i_j(t), P_j(t))$, $j = \overline{1, n}, t = \overline{1, T}$, – расход топлива на t -м интервале при составе $i_j(t)$ и нагрузке $P_j(t)$ j -й станции, определяемый по соответствующей расходной характеристике $B_j(i_j, P_j)$ как

$$B_j(i_j(t), P_j(t)) = (\theta^t - \theta^{t-1})B_j(i_j, P_j);$$

$r_+, r_-, 0 < r_- < 1, 0 < r_+ < 1$ – заданные коэффициенты резерва соответственно по техническому минимуму и располагаемой мощности ЭЭС.

Из определения (8) компонент $s_j(t)$ состояния $S(t)$ следует, что в случае когда составы $i_j(t-1), i_j(t)$ удовлетворяют ограничению (3), состояние $S(t)$ однозначно определяется состоянием $S(t-1)$ и составом

$$i_j(t), j = \overline{1, n},$$

$$S(t) = f(S(t-1), I(t)),$$

где $I(t) = \{i_1(t), i_2(t), \dots, i_n(t)\}$.

Составы $i_j(0)$, и множество $S(0)$ будут известны из решения соответствующей задачи на предшествующие сутки. Графы переходов, расходные характеристики $B_j(i_j, P_j)$, зависимости расходов на пуск или останов агрегатов $D_j(s_j(t-1), i_j(t))$, логические функции $y_{v\mu}(s_j(t-1), t)$, функции $P_j^{\min}(t)$, $P_j^{\max}(t)$ могут быть заблаговременно определены на нижнем уровне пространственной иерархии, т.е. решением ряда оптимизационных задач для каждой станции. Величины $P(t)$ находятся суммированием прогнозов активных нагрузок в узлах и заданных диспетчерской службой ЭЭС перетоков активной мощности по межсистемным связям.

Для согласования решений проблем смежных уровней временной иерархии используется традиционная задача краткосрочного планирования, в виде

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^n B_{ij}(P_j^t) \rightarrow \min \\ & \sum_{j=1}^n P_j^t - \sum_{v=1}^l P_v^t - \pi^t(P^t, p^t), \quad t = \overline{1, T}; \\ & P_{j \min}^t \leq P_j^t \leq P_{j \max}^t, \quad t = \overline{1, T}, \quad j = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

Сформулированная задача распадается на независимо решаемые подзадачи нижних уровней временной иерархии (ЭС, ПЭС, РЭС и т. д.). Интегральная оценка, полученная путем агрегирования накопленной информации, используется при решении подзадач нижнего уровня уже в цикле оперативного управления текущим режимом ЭЭС.

МИНИМИЗАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ КОНЕЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Зеленко В.В., Суходолов Ю.В., Шейников А.А.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Рассматривается возможность минимизации погрешностей, возникающих при гармоническом анализе диагностических сигналов конечной длительности с помощью цифровых средств измерения.

Проводится анализ целесообразности применения различных весовых окон для устранения искажений, обусловленных разрывами и скачками при периодизации диагностических сигналов конечной длительности.

Текст доклада:

Методика эксплуатационного контроля, основанная на спектральном анализе снимаемых сигналов напряжения, предполагает применение в составе измерительного комплекса средств на базе ЦВМ, позволяющих производить не только измерение, но также накопление и обработку диагностической информации.

При обработке сигналов напряжения конечной длительности возникают вопросы, которые необходимо учитывать в процессе гармонического анализа. В частности, конечный интервал наблюдения влияет на точность оценок параметров сигналов. Так, на практике обрабатываемый массив данных состоит из m отсчетов принятого сигнала. Следовательно, с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) можно получить m отсчетов соответствующего периодического спектра.

При разложении в ряд Фурье конечный участок сигнала напряжения принимается за один период T , который повторяется с частотой $1/T$. Вследствие этого на границах периодов функции появляются разрывы или скачки, что существенно искажает спектр.

Для устранения этих искажений применяются так называемые весовые окна, размер которых равен размеру анализируемого участка. Умножение на весовое окно позволяет свести сигнал напряжения к нулю вблизи краев участка, что в значительной степени устраняет искажения спектра.

На практике применяются следующие окна: прямоугольное (окно Дирехле); треугольное (Фейера и Бартлетта); вида $\cos^u(X)$; Хэмминга; Блэкмана; Рисса (Бохнера, Паэна); Римана; Валле – Пуссена (Джексона, Парэна); Тьюки; Бомана; Пуассона; Хэннинга – Пуассона; Коши (Абея, Пуассона); Гаусса (Вейерштрасса); Дольфа – Чебышева; Кайзера – Бесселя; Барсилона – Темеша. Правильный выбор окна особенно важен при выделении с помощью ДПФ отдельных гармоник в сигнале. Для того, чтобы динамический диапазон обнаружимых сигналов был максимален, преобразование окна должно иметь узкий главный лепесток и очень низкий уровень боковых лепестков. Многие классические окна удовлетворяют этому критерию.

При выделении близких, но существенно отличающихся по амплитуде гармоник наилучшего результата можно достичь при использовании окна Кайзера – Бесселя в связи с легкостью вычисления коэффициентов и возможностью уменьшения уровня боковых лепестков за счет увеличения произведения длительности на полосу частот [1].

Однако применение окна Кайзера – Бесселя целесообразно только в случае необходимости обеспечения максимального спектрального разрешения по частоте. В большинстве же случаев при техническом диагностировании более важной задачей является правильная оценка значений амплитуд характерных гармонических составляющих.

Амплитудные искажения спектра обусловлены наличием широкополосного шума, попадающего в полосу пропускания окна.

В этом смысле окно ведет себя как фильтр, мощность сигнала на выходе которого пропорциональна мощности гармоник входного сигнала в полосе его пропускания. Таким образом, для обнаружения гармонического сигнала необходимо минимизировать накопленный шум за счет уменьшения полосы пропускания окна. Однако, из анализа видно, что в этом случае снижается спектральное разрешение по частоте в связи с увеличением уровня боковых лепестков при приближении параметров весового окна к прямоугольному (имеющему минимальную полосу пропускания).

Из рассмотренных особенностей ДПФ диагностических сигналов можно сделать вывод, что рациональным здесь является применение весовых окон, обеспечивающих одновременно приемлемое разрешение по частоте и амплитуде.

Одним из таких окон является треугольное окно (окно Барлетта). Целесообразность его применения на практике обусловлена простотой математических расчетов при спектральном анализе диагностических сигналов.

Литература

1. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. / Р. Лайонс. – 2-е изд. – М.: Бинном, 2006. – 656 с.

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ АНАЛИЗА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Зеленко В.В., Исаев А.В., Суходолов Ю.В.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Рассмотрен метод обнаружения витковых замыканий в обмотках асинхронных электродвигателей путем анализа амплитудно-частотных характеристик обмоток, основанный на резонансных свойствах обмоток.

Текст доклада:

Для обнаружения дефектов обмоток асинхронных электродвигателей используются методы, основанные на резонансных свойствах обмоток, обладающие высокой чувствительностью к витковым замыканиям. Такие методы учитывают резонансные явления и основаны на анализе амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик обмоток в исправном состоянии и при витковом замыкании.

Использование синусоидального сигнала с частотой, которая устанавливается в процессе измерения или сигнала повышенной частоты, позволяет использовать резонансные свойства обмотки и получить высокую чувствительность к витковым замыканиям [1].

Экспериментальные исследования проводились для трех типов асинхронных электродвигателей: АИР 80 А4, АИР 80 В4 при соединении обмоток по схеме «глухая звезда» и АИР 100 S4 с выводом нейтральной точки обмоток.

Для испытуемых электродвигателей были разработаны семь экспериментальных схем с различным способом подачи сигнала в обмотки, пять из которых были определены как наиболее оптимальные. Испытательные схемы включали генератор синусоидального сигнала, частота которого изменялась в процессе эксперимента в пределах от 0 до 500 кГц, дифференциальный усилитель, осциллограф и испытуемые обмотки статоров электродвигателей. В одной фазе контролируемой обмотки каждого испытуемого электродвигателя были вмонтированы устройства, при помощи которых витки шести катушек обмоток закорачивались и путем включения дополнительных резисторов в закороченные витки, сопротивление в месте замыкания изменялось. Амплитудно-частотные характеристики были сняты для исправной обмотки и при витковом замыкании в каждой из катушек одной фазы обмотки. Выходной сигнал представлял собой разность напряжений на двух фазах обмотки, в одной из которых закорачивались витки.

Достоинством схем, которые позволяют исследовать разность частотных характеристик фаз обмотки – является уменьшение влияния нестабильности амплитуды входного сигнала, а также уменьшение влияние на результаты контроля технологического разброса параметров обмотки.

Экспериментальные исследования проводились с целью нахождения участка АЧХ, имеющего максимальную чувствительность выходных сигналов к витковым замыканиям и минимальную к отклонениям параметров испытуемой обмотки. Увеличение точности контроля основано на использовании резонансного участка АЧХ, при котором изменение выходного сигнала будет максимальным при витковом замыкании и минимальным при отклонении параметров исправной обмотки в допустимых пределах.

Анализ полученных результирующих АЧХ обмоток статоров электродвигателей показал, что они имеют явно выраженный первый частотный максимум, величина которого, в зависимости от схемы и асинхронного электродвигателя, увеличивается в 5–20 раз при витковом замыкании, не зависит от места замыкания, лежит в пределах 30–100 кГц и является пред-

почтительным при контроле. На более низких частотах изменения АЧХ незначительно, а на более высоких частотах оказывают влияние неравенство распределений емкостей фаз обмотки за счет технологических факторов.

Литература

1. Каганов З.Г. Волновые напряжения в электрических машинах. – М., 1970.
2. Билибин К.И., Духанин А.М., Скороходов Е.А. Намоточные работы в производстве элементов электроавтоматики. – М.: Энергия, – 1972. – 216 с.
3. Кокорев А.С. Контроль и испытание электрических машин, аппаратов и приборов. – М.: Высшая школа, 1990. – 271 с.: ил.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ В PROTEUS

Матвеев И.П.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

В работе рассмотрены вопросы компьютерного моделирования схем управления различными типами электродвигателей с использованием микроконтроллеров, позволяющие виртуально проверить работу устройств.

Текст доклада:

Системы автоматизированного управления электродвигателями, как правило, включают электронные схемы с использованием микроконтроллеров различных типов. Но, чтобы проверить работу таких схем с микроконтроллерами, необходимо написать программу, занести ее в микроконтроллер, подключить электродвигатели и только потом оценить, как работает разработанная программа применительно к конкретным устройствам. Все это оказывается достаточно трудоемким. Но благодаря компьютерному моделированию такую задачу решать стало проще.

В настоящее время в электронике для решения такой задачи широко используются программы схемотехнического проектирования Micro-Cap, Electronic WorkBench, MathLab, Proteus.

В данной работе для проведения компьютерного моделирования была использована программа Proteus, которая основана на моделях электронных компонентов и включает достаточно большой перечень этих компонентов, а также основные типы микроконтроллеров: AVR, ARM, PIC, которые можно программировать, используя электронный конструктор Arduino. Аппаратная часть Arduino представляет собой плату ввода-вывода, которая может быть запрограммирована с использованием языков C/C++[1].

В реальности разработанная программа прошивается на кристалл микроконтроллера с помощью специальных устройств-программаторов. Но для Arduino не требуется программатор. Программу можно загрузить в микроконтроллер с помощью USB-шнура, используя специальную прошивку или специальную программу – бутлоадер.

В данной работе были использованы микроконтроллеры AVR фирмы ATMEL, которые являются современными высокопроизводительными и экономичными контроллерами различного назначения [2], с помощью которых возможно реализовать оптимальные (энергосберегающие) режимы работы электродвигателей. Семейство микроконтроллеров megaAVR имеет достаточно разнообразные характеристики: большой объем памяти, необходимое в большинстве случаев количество выводов, соответствующий набор периферийных устройств, возможность повторного использования кода в других проектах.

При моделировании схемы для управления двумя двигателями постоянного тока с возможностью регулирования скорости и направления вращения электродвигателей был использован микроконтроллер ATmega 328P. Была собрана виртуальная электронная схема (рис. 1), выбраны элементы и размещены на выделенном пространстве. В работе используется микроконтроллер AVR фирмы ATMEL типа ATmega 328P, к выходным портам которого подключается микросхема L298. Контроллер управляет работой электродвигателя постоянного тока, используя широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) в соответствии с написанной программой.

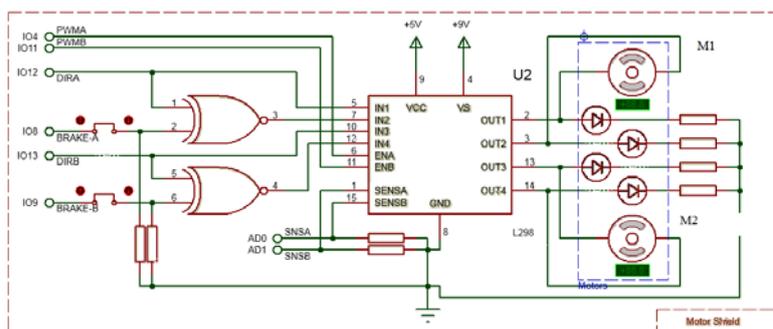


Рис. 1. Схема управления электродвигателями постоянного тока

Кроме того, была спроектирована схема управления шаговым электродвигателем (рис. 2).

Для создания проекта была собрана виртуальная электронная схема, которая включает микроконтроллер AVR фирмы ATMEL типа ATmega16, микросхему ULN2003, схему изменения направления движения ротора с кнопками Revers-Forward, схему питания и кварцевый генератор для задания частоты импульсных сигналов.

Микросхема ULN2003 представляет набор мощных ключей. Применяется для управления нагрузкой большой мощности, например, электромагнитными реле, двигателями постоянного тока, электромагнитными клапанами, в схемах управления различными шаговыми двигателями.

При сборе схемы элементы размещаются на выделенном пространстве, проверяется работа собранного устройства в соответствии с разработанной программой, записанной в микроконтроллер. Запускается эмуляция программы, и наблюдаем работу схемы в соответствии с программой [3] для микроконтроллера.

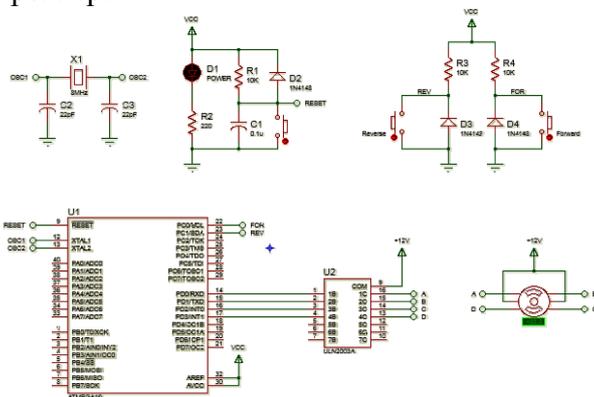


Рис. 2. Схема управления шаговым двигателем

Контроллер вырабатывает управляющий код, поступающий на микросхему ULN2003, в зависимости от количества импульсов, формируемых кнопками Revers-Forward. В процессе эмуляции визуально можно наблюдать вращение электродвигателя. Управление скоростью и направлением вращения осуществляется программой, записанной в микроконтроллер.

Таким образом, с помощью программы Proteus легко моделировать электронные схемы управления различными электродвигателями и проводить ее отладку.

Литература

1. Электронный ресурс: <http://fb.ru/article/206826/arduino-dlya-nachinayuschih-poshagovyye-instruktsii-programmirovaniye-i-proektyi-arduino-s-chego-nachat>.
2. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. – 592 с.
3. Электронный ресурс: <http://www.joyta.ru/551-upravlenie-shagovym-dvigatелем/>

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ – КЛЮЧЕВОЙ ВОПРОС РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ

Мороз Р.Р.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Важнейшим условием ускоренного развития народного хозяйства является экономия топливно-энергетических ресурсов во всех отраслях. Экономия ресурсов включает в себя много направлений, в том числе: устранение непроизводительных потерь топлива, переход на новые энергосберегающие технологии, замена устаревшего оборудования новым, более экономичным и т. д.

Текст доклада:

Анализ показывает, что затраты, необходимые для обеспечения экономии топлива, существенно меньше, чем затраты на увеличение добычи такого же количества топлива.

Для ускоренного развития народного хозяйства одним из важнейших условий является экономически обоснованная экономия топливно-энергетических ресурсов во всех отраслях промышленности, в том числе и в электроэнергетике. Масштабы потерь таковы, что на их покрытие в год тратится около 7 млн. т. условного топлива. Интенсификация энергосбережения – один из узловых вопросов развития народного хозяйства. Она включает в себя большое число направлений, в том числе строжайшую экономию энергоресурсов за счет устранения непроизводительных потерь топлива, тепловой энергии, электроэнергии; переход на новые энергосберегающие технологии; замену устаревшего оборудования новым, более экономичным и т. д. Анализ показывает, что затраты, необходимые для обеспечения экономии топлива в народном хозяйстве, существенно меньше затрат на увеличение добычи такого же количества топлива.

Интенсификация энергосбережения – одна из сторон развития народного хозяйства. Суть его заключается в использовании всего комплекса эффективных мероприятий, направленных на существенное уменьшение удельных энергозатрат на производство продукции, повышение производительности труда и т. д.

К числу мероприятий по экономии энергоресурсов относятся:

- переход на энергосберегающие технологии производства, повышение уровня организации производства, сокращение материалоемкости выпускаемой продукции;
- совершенствование структуры энергетического оборудования, демонтаж и реконструкция устаревшего оборудования;
- разработка и внедрение более эффективных энергопотребителей (электроприводов и другого энергопотребляющего оборудования), совершенствование управления их режимами;
- применение комбинированных энерготехнологических процессов.

Перечисленные мероприятия требуют соответствующих (причем в ряде случаев значительных) капиталовложений. Учитывая напряженный баланс инвестиций в народное хозяйство, необходимо прежде всего использовать меры, не связанные с большими капиталовложениями, т.е. в первую очередь меры по снижению непроизводительных потерь электроэнергии. Относительно малые затраты на снижение разных потерь характерны и для всех отраслей народного хозяйства.

Литература

1. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: практ. пособие в 5-ти кн. / под ред. В.А. Веникова. – Кн. 2. Энергосбережение в электроприводе / Н.Ф. Ильинский, Ю.В. Рожанковский, А.О. Горнов. – Высш. шк., 1989. – 127 с.
2. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: практ. пособие в 5-ти кн./ под ред. В.А. Веникова. – Кн. 5. Экономия электроэнергии на промышленных предприятиях / Т.В. Анчарова, С.И. Гамазин, В.В. Шевченко. – Высш. шк., 1990. – 143 с.
3. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 208 с.

К ВОПРОСУ ОБ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Михальцевич Г.А.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

В условиях РБ, где нет достаточного количества углеводородного сырья, весьма перспективным направлением сделать национальную экономику энерго-эффективной и конкурентоспособной на мировом рынке является потребление топливно-энергетических ресурсов, обеспечивающихся за счет местных видов топлива и различных видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) (энергия ветра, солнца, биогаза и др.) [1].

Текст доклада:

Проблема повышения эффективности производства на сельскохозяйственных предприятиях, защита окружающей среды от выбросов химических и термических остатков при технических процессах переработки сельскохозяйственной продукции аграрного промышленного комплекса (АПК) имеют особое значение в сельской местности. Здесь в результате природных и экологических причин, часто происходит отключение, как отдельных населенных пунктов, так и целых районов, от систем центрального энергоснабжения. Такие несанкционированные отключения наносят значительный материальный урон, как отдельным предприятиям, так и экономике в целом, стране.

Анализ состояния дел в энергетическом обеспечении АПК, в сложившейся экономической ситуации страны показывает, что необходимо уделить особое внимание вопросам экономного и эффективного распределения и расходования энергетических ресурсов.

Таким образом, применение ВИЭ для решения задач энергоснабжения и энергообеспечения АПК решает ряд проблем, как экономики, так и экологии предприятий сельскохозяйственных районов и социальных вопросов, проживающих здесь людей.

Очевидно, что политика энергосбережения должна базироваться на разработке и внедрения современных методов и структур производства, распределения и использования электроэнергии с учетом новых энергосберегающих технологий.

Особенно следует уделить пристальное внимание энергосбережению в сельском хозяйстве с привлечением таких энергетических ресурсов, как возобновляемые и вторичные источники энергии, которые не требуют использования органического топлива (газ, нефть, уголь и т. д.) и не загрязняют окружающую среду.

В регионах РБ имеются значительные ресурсы возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Даже обобщения небольшого опыта практического использования возобновляемых источников энергии в энергобалансе страны показывают, что можно значительно снизить дефицит ограниченного топлива.

Так, разработка новых ветроагрегатов, использующих энергию ветра при его скорости в 1–5 м/с увеличит ветроэнергетический потенциал РБ до 1400 млрд. кВтч, что эквивалентно 172 млн. тон условного топлива (т. у. т.) [2].

Рассматривая расположение ресурсов ВИЭ на территориях районов страны, необходимо учитывать характеристики потенциалов ожидаемых запасов энергии, таких как состояния ветровых режимов, поступления солнечной энергии, количества и род животных для производства биогаза.

За счет новых технологий, передовых методов трансформации энергии: ветра, солнца, биогаза и т. д., современных конструкций систем, использующих излучение солнечной энергии, усовершенствованные ветровые электроустановки, более экономичные способы полу-

чения биогаза из сбраживания биологической массы и т. д., можно значительно снизить зависимость от традиционных источников энергии уже к 2030 г. Стоимость получения 1 кВт энергии от нетрадиционных источников, сопоставима со стоимостью энергии, полученной традиционными способами: от АЭС, ТЭЦ, ГЭС и т. д.

В ряд регионов страны, имеющие высокие потенциалы нескольких видов возобновляющих энергоресурсов (ветер, гелиоресурсы, биоресурсы и т. д.), характеризуются, однако не столь высокими значениями, или производимой энергии за счет наличия устаревших конструкций различных установок для преобразования солнечной энергии, энергии ветра, энергии биогаза и т. д.

В последнее время, как в РБ, так и во всем мире возрос интерес к ветровым электроустановкам [3, 4]. Особенно это актуально для сельскохозяйственных районов. Например, ветроэнергетическая установка, расположенная на площадке, где среднегодовая удельная мощность воздушного потока составляет около 500 Вт/м^2 (скорость воздушного потока при этом равна 7 м/с), может преобразовывать в электроэнергию около 175 из этих 500 Вт/м^2 . В зависимости от ветроэнергетической установки при скорости ветра от 3 до 7 м/с. Номинальная мощность установок обычно колеблется от 1 до 100 кВт.

За счет них можно получить в ближайшее время экономию до 20 % от потребности РБ в тепловой и энергетической энергии [1].

Основными характеристиками, определяющими определенный потенциал ветровой энергии в данной местности, являются:

- годовые и суточные направления ветра;
- максимальная и минимальная скорость ветра;
- распределение ветровых и энергетических периодов затиший по длительности;
- удельная энергия ветра и ветроэнергетические ресурсы отдельных регионов страны.

В настоящее время особый интерес возрос к ветровым установкам малой и средней мощности, используемые в сельском хозяйстве. Например, в США порядка 5 % от всей электроэнергии, необходимой для обслуживания сельского хозяйства, производится ветровыми электроустановками [2].

Эффективным электро- и теплоснабжением потребителей в сельской местности, удаленных от центральных электромагистралей, может быть использование при совместной эксплуатации, ветровых установок и малых ГЭС или в сочетании с работой гелиосистем различной мощности в зависимости от требований потреблений.

Увеличение возобновляемых источников энергии в 2 раза позволит сэкономить 5,7 млн. т. у. т., что эквивалентно экономии импортируемого природного газа – до 2,4 млрд. м^3 .

Ветроэнергетика в Беларуси характеризуется определенным всплеском энергии ветряков в дневное время и затухание ветров по утрам и вечерам. При этом необходимо компенсировать недостающие мощности в центральной энергетической системе затратами органического топлива на классических энергоустановках.

Как показывают исследования регионов РБ, они имеют высокие потенциалы ветроэнергетических ресурсов и поэтому для энергоснабжения малых и удаленных сельских потребителей целесообразно использовать ветровую энергию ветряков с экономичными генераторами электрической энергии.

Планируется в ближайшие 15 лет ввести в эксплуатацию генерирующие ветряки с общей мощностью 10^7 кВт.

В настоящее время, используемые в мире ветроэнергетические установки, имеют мощность более 25000 МВт.

По мнению экспертов ведущих стран Германии, Испании, Дании, Франции и др. в области выработки энергии с помощью ВЭУ, в ближайшее время мощность действующих ветровых установок в мире достигает 75000 МВт. Уже сейчас подсчитано, что энергия ветра обеспечивает 10 % потребности в электроэнергии стран Западной Европы.

Разведение в Беларуси площадки под установку ветряков на возвышенностях в 200–300 м над уровнем моря, позволит установить ВЭУ, где средняя скорость ветра будет достигать 7 м/с, что достаточно для производства электроэнергии. Даже реализация этой программы на 10 % позволяла бы снять имеющиеся проблемы в РБ с производством электрической энергии за счет собственных энергоресурсов страны.

Согласно [2] годовой ветроэнергетический потенциал РБ составляет 224–280 млрд. кВт · ч.

Установка 8000 ВЭУ мощностью 100–500 кВт на выявленных площадках позволило бы экономить стране ежегодно до 1 млн. т. у. т.

Таким образом, создание принципиально новых типов ВЭУ, эффективность работы которых на порядок выше работы уже существующих ветроэнергетических установок, позволит обеспечить промышленность РБ и, в частности ее сельское хозяйство, экологической чистой электроэнергией и значительно уменьшить зависимость от углеводородного топлива, закупленного за границей.

Совместное использование ветроустановок и гелиосистем мощностью от 1 до 10 кВт для автономных фермерских хозяйств, отдельных населений или загородных домов дачного назначения в зависимости от сезона года или состояния ветра или гелио энергии позволит частично, а в некоторых случаях полностью обойтись без сетей централизованного электроснабжения.

Литература

1. Полищук, А.А. Перспективы разработки и использования местных возобновляемых и нетрадиционных источников энергии в сельском хозяйстве / А.А. Полищук А.А., Г.А. Михальцевич // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Труды 7-й Международной научно-технической конференции (18–19 мая 2010 года, Москва, ГНУ ВИЭСХ). – В 5-ти частях. Часть 4. – Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010.– С. 9–13.

2. Полищук, А.А. Анализ энергоэффективности нетрадиционных источников энергии в сельском хозяйстве / А.А. Полищук, В.К. Мороз, Г.А. Михальцевич, А.В. Мороз // Материалы международной научно-технической конференции. – Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК, Минск, 23–24 октября 2009 г. – В 2 ч. Ч.1 М.А. Прищепов и [др.]; под ред. М.А. Прищепова – Минск: БГАТУ, 2009.– С. 111–114.

3. Мхитарян, Н.М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников / Н.М. Мхитарян. – Киев: Наукова думка, 2002.

4. Шерьязов, С.К. Возобновляемые источники в системе энергосбережения сельскохозяйственных потребителей / С.К. Шерьязов // Монография – Челябинск: ЧГАУ, 2008.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНИВАНИЮ ПОГРЕШНОСТЕЙ И
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ МЕТОДОМ «ТРЕХ ВАТТМЕТРОВ»**

Савкова Е.Н., Сипачев И.В., Малашонок С.В.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация

Приведены методические рекомендации по оцениванию погрешностей и неопределенностей результатов измерений активной мощности переменного тока в трехфазных цепях методом «трех ваттметров», которые по модульному принципу могут быть использованы при проведении сличений результатов измерений в аккредитованной лаборатории как метрологической процедуры согласно новому законодательству в области обеспечения единства измерений.

Текст доклада:

Согласно Закону Республики Беларусь от 11 ноября 2019 г. № 254-З «Об изменении Закона Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» одной из процедур метрологической оценки является сличение результатов измерений на внутрилабораторном или межлабораторном уровнях. В данной связи на базе лабораторий кафедры «Электротехника и электроника» в рамках учебных дисциплин «Электрические измерения» и «Метрология, стандартизация и сертификация» были проведены внутрилабораторные сличительные эксперименты по оценке точности (погрешности и неопределенности) результатов измерений и разработано методическое обеспечение сличения результатов измерений активной мощности переменного тока в трехфазных цепях. Эксперимент осуществлялся по двум направлениям: с помощью метода «трех ваттметров» и с помощью индукционного счетчика электрической энергии.

Модель математических ожиданий результата измерения электрической мощности методом «трех ваттметров» выглядит следующим образом:

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \quad (1)$$

где P_1, P_2, P_3 – показания первого, второго и третьего ваттметров соответственно.

Модель рассеяния (относительной погрешности) с учетом применения амперметра и вольтметра запишется в виде:

$$\delta(P) = \sqrt{\delta^2(P_1) + \delta^2(P_2) + \delta^2(P_3) + \delta^2(I) + \delta^2(U)}, \quad (2)$$

где $\delta(P_1), \delta(P_2), \delta(P_3)$ – относительные погрешности измерения активной электрической мощности с помощью первого, второго и третьего ваттметров соответственно;

$\delta(I)$ – относительная погрешность измерения электрического тока с помощью амперметра;

$\delta(U)$ – относительная погрешность измерения электрического напряжения с помощью вольтметра.

В свою очередь, данные погрешности раскладываются на составляющие – субмодели второго уровня:

$$\delta(P_1) = \sqrt{\delta_{11}^2 + \delta_{12}^2}. \quad (3)$$

$$\delta(P_2) = \sqrt{\delta_{21}^2 + \delta_{22}^2}. \quad (4)$$

$$\delta(P_3) = \sqrt{\delta_{31}^2 + \delta_{32}^2}. \quad (5)$$

$$\delta(I) = \sqrt{\delta_{I1}^2 + \delta_{I2}^2}. \quad (6)$$

$$\delta(U) = \sqrt{\delta_{U1}^2 + \delta_{U2}^2}. \quad (7)$$

где δ_{11} , δ_{21} , δ_{31} – относительные инструментальные погрешности первого, второго и третьего ваттметров соответственно для данного показания;

δ_{I1} – относительная погрешность амперметра для данного показания;

δ_{U1} – относительная погрешность вольтметра для данного показания;

δ_{12} , δ_{22} , δ_{32} – субъективные погрешности, обусловленные считыванием показаний со шкалы первого, второго и третьего ваттметров соответственно;

δ_{I2} – субъективная погрешность, обусловленная считыванием показаний со шкалы амперметра;

δ_{U2} – субъективная погрешность, обусловленная считыванием показаний со шкалы вольтметра.

Приведем формулы для расчета данных погрешностей - субмодели третьего уровня. Для относительных инструментальных погрешностей ваттметров, амперметра и вольтметра:

$$\delta_{11} = \frac{\gamma_1 P_{k1}}{P_{j1}}. \quad (8)$$

$$\delta_{21} = \frac{\gamma_2 P_{k2}}{P_{j2}}. \quad (9)$$

$$\delta_{31} = \frac{\gamma_3 P_{k3}}{P_{j3}}. \quad (10)$$

где γ_1 , γ_2 , γ_3 – приведенные погрешности первого, второго и третьего ваттметров соответственно (в эксперименте $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3$);

P_{k1} , P_{k2} , P_{k3} – значения границ диапазонов измерений первого, второго и третьего ваттметров соответственно (в эксперименте $P_{k1} = P_{k2} = P_{k3}$);

P_{j1} , P_{j2} , P_{j3} – показания первого, второго и третьего ваттметров соответственно.

$$\delta_{I1} = \frac{\gamma_I I_k}{I_j}. \quad (11)$$

где γ_I – приведенная погрешность амперметра;

I_k – значение границы диапазона измерений амперметра;

I_j – показание амперметра.

$$\delta_{U1} = \frac{\gamma_U U_k}{U_j}. \quad (12)$$

где γ_1 – приведенная погрешность вольтметра;

I_k – значение границы диапазона измерений вольтметра;

I_j – показание вольтметра.

Для субъективных погрешностей, обусловленных считыванием показаний со шкал измерительных приборов:

$$\delta_{12} = \frac{\eta_1}{2P_{j1}}. \quad (13)$$

$$\delta_{22} = \frac{\eta_2}{2P_{j2}}. \quad (14)$$

$$\delta_{32} = \frac{\eta_3}{2P_{j3}}. \quad (15)$$

где η_1, η_2, η_3 – цена деления первого, второго и третьего ваттметров соответственно ($\eta_1 = \eta_2 = \eta_3$).

$$\delta_{I2} = \frac{\varepsilon}{2I_j} \quad (16)$$

$$\delta_{U2} = \frac{\varphi}{2U_j}. \quad (17)$$

где φ – цена деления вольтметра.

Подставляя данные составляющие в выражение (2), получим формулу для вычисления суммарной относительной погрешности измерения активной электрической мощности методом трех ваттметров. Результат измерения запишется в виде модели:

$$(A \pm \Delta); P = 0,95, \quad (18)$$

где A – значение измеряемой величины;

Δ – граница погрешности результата измерения;

P – доверительная вероятность.

Границы погрешности найдем по формуле:

$$\Delta = \pm 1,1A\delta(P) \quad (19)$$

Таким образом, результат измерения запишется на базе теории погрешностей в виде:

$$(A \pm \Delta); P = 0,95 \quad (20)$$

Учитывая требования стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 к аккредитованным лабораториям в части представления результатов измерений в виде интервалов охватов на базе концепции неопределенности, приведем рекомендации по оцениванию неопределенностей

входных и выходных величин. Общая модель рассеяния (неопределенности выходной величины – электрической активной мощности) запишется в виде:

$$u(P) = \sqrt{u^2(P_1) + u^2(P_2) + u^2(P_3) + u^2(I) + u^2(U)}. \quad (21)$$

В относительном виде:

$$\frac{u(P)}{P} = \sqrt{\frac{u^2(P_1)}{P_1^2} + \frac{u^2(P_2)}{P_2^2} + \frac{u^2(P_3)}{P_3^2}}. \quad (22)$$

Анализ составляющих $U(P_1)$, $U(P_2)$, $U(P_3)$ удобно начинать с субмодели нижнего (третьего) уровня. Так, в предположении равновероятного распределения вероятностей и приняв за интервалы варьирования границы инструментальных погрешностей измерительных приборов, получим выражения для инструментальных неопределенностей ваттметров, амперметра и вольтметра в относительном виде:

$$u(\delta_{11}) = \frac{\gamma_{1P_{k1}}}{\sqrt{3}P_{j1}}. \quad (23)$$

$$u(\delta_{21}) = \frac{\gamma_{2P_{k2}}}{\sqrt{3}P_{j2}}. \quad (24)$$

$$u(\delta_{31}) = \frac{\gamma_{3P_{k3}}}{\sqrt{3}P_{j3}}. \quad (25)$$

$$u(\delta_{I1}) = \frac{\gamma_{II_k}}{\sqrt{3}I_j}. \quad (26)$$

$$u(\delta_{U1}) = \frac{\gamma_{IU_k}}{\sqrt{3}U_j}. \quad (27)$$

Для неопределенностей, обусловленных считыванием показаний со шкал измерительных приборов, в предположении равновероятного распределения вероятностей и приняв за интервалы варьирования границы субъективных погрешностей измерительных приборов, получим выражения для неопределенностей, обусловленных считыванием показаний со шкал ваттметров, амперметра и вольтметра в относительном виде:

$$u(\delta_{12}) = \frac{\eta_1}{2\sqrt{3}P_{j1}}. \quad (28)$$

$$u(\delta_{22}) = \frac{\eta_2}{2\sqrt{3}P_{j2}}. \quad (29)$$

$$u(\delta_{32}) = \frac{\eta_3}{2\sqrt{3}P_{j3}}. \quad (30)$$

$$u(\delta_{I1}) = \frac{\varepsilon}{2\sqrt{3}I_j}. \quad (31)$$

$$u(\delta_{U2}) = \frac{\varphi}{2\sqrt{3}U_j}. \quad (32)$$

Субмодели второго уровня запишутся в относительном виде следующим образом:

$$\frac{u(P_1)}{P_1} = \sqrt{\left(\frac{\gamma_{1P_{k1}}}{\sqrt{3}P_{j1}}\right)^2 + \left(\frac{\eta_1}{2\sqrt{3}P_{j1}}\right)^2}. \quad (33)$$

$$\frac{u(P_2)}{P_2} = \sqrt{\left(\frac{\gamma_{2P_{k2}}}{\sqrt{3}P_{j2}}\right)^2 + \left(\frac{\eta_2}{2\sqrt{3}P_{j2}}\right)^2}. \quad (34)$$

$$\frac{u(P_3)}{P_3} = \sqrt{\left(\frac{\gamma_{3P_{k3}}}{\sqrt{3}P_{j3}}\right)^2 + \left(\frac{\eta_3}{2\sqrt{3}P_{j3}}\right)^2}. \quad (35)$$

$$\frac{u(I)}{I} = \sqrt{\left(\frac{\gamma_{II_k}}{\sqrt{3}I_j}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2\sqrt{3}I_j}\right)^2}. \quad (36)$$

$$\frac{u(P_1)}{P_1} = \sqrt{\left(\frac{\gamma_{1P_{k1}}}{\sqrt{3}P_{j1}}\right)^2 + \left(\frac{\eta_1}{2\sqrt{3}P_{j1}}\right)^2}. \quad (37)$$

Подставив субмодели второго уровня (33–37) в исходную модель (22), получим результирующее выражение для неопределенности, ассоциированной с выходной величиной. Интервал охвата (результат измерения) запишется в виде:

$$(A \pm U) / p = 95 \%, \quad (38)$$

где U – расширенная неопределенность выходной величины, полученная путем умножения неопределенности выходной величины $U(P)$ на коэффициент охвата $k=2$ в предположении нормального распределения вероятностей выходной величины с уровнем доверия $p = 95 \%$:

$$U(P) = 2u(P) \quad (39)$$

Разработанные методические рекомендации по оцениванию погрешностей и неопределенностей результатов измерений активной мощности переменного тока в трехфазных цепях методом «трех ваттметров» могут быть взяты за основу при обработке результатов сравнительных внутрилабораторных и межлабораторных экспериментов в рамках верификации методов испытаний.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Менжинский А.Б., к.т.н., доцент Малашин А.Н.
Военная академия Республики Беларусь

Аннотация:

В настоящее время в качестве перспективных электромеханических преобразователей энергии рассматриваются электрические генераторы возвратно-поступательного движения (ЭГВПД) [1]. Нашедшие широкое применение в системах «свободнопоршневой двигатель (СПД) – ЭГВПД» [2, 3]. Это в свою очередь требует развития теории электромеханики в области ЭГВПД с целью повышения эффективности системы «СПД – ЭГВПД».

Текст доклада:

Интерес к исследованию системы «СПД – ЭГВПД» обусловлен рядом ее преимуществ по сравнению с электроагрегатами на базе двигателя внутреннего сгорания с кривошипно-шатунным механизмом [2, 3]:

- относительно простая конструкция – на 40 % меньше элементов;
- отсутствие вращающихся частей, что в 2,5–3 раза позволяет увеличить габаритную мощность;
- относительно высокий коэффициент полезного действия и ресурс работы до капитального ремонта 30–50 тыс. ч;
- сниженный до 30 % расход топлива;
- относительно малая длительность пуска при низких температурах;
- способность работать на широкой номенклатуре топлива;
- относительно высокая экологичность;
- сравнительно легкое модульное исполнение.

Из представленных в [4] структур ЭГВПД видно, что возможен широкий спектр новых структур ЭГВПД с продольным и комбинированным (поперечным и продольным) изменением магнитного потока.

Существует ряд работ, в которых уже проведена классификация ЭГВПД с поперечным изменением магнитного потока [5–8]. Однако в связи со множеством предлагаемых вариантов структур ЭГВПД продольного и комбинированного типов [4], а также существующих ЭГВПД поперечного типа [1, 5–8] возникает необходимость проведения их совместной классификации, что позволит обоснованно осуществлять выбор структуры ЭГВПД для использования в конкретных системах «СПД – ЭГВПД». С этой целью была проведена их совместная классификация (рис. 1) по следующим основным признакам:

- способу изменения магнитного потока (МП);
- направлению МП в магнитопроводе (МПр) относительно направления движения подвижной части [5];
- полярности МП через рабочую обмотку;
- особенностям конструктивного исполнения.

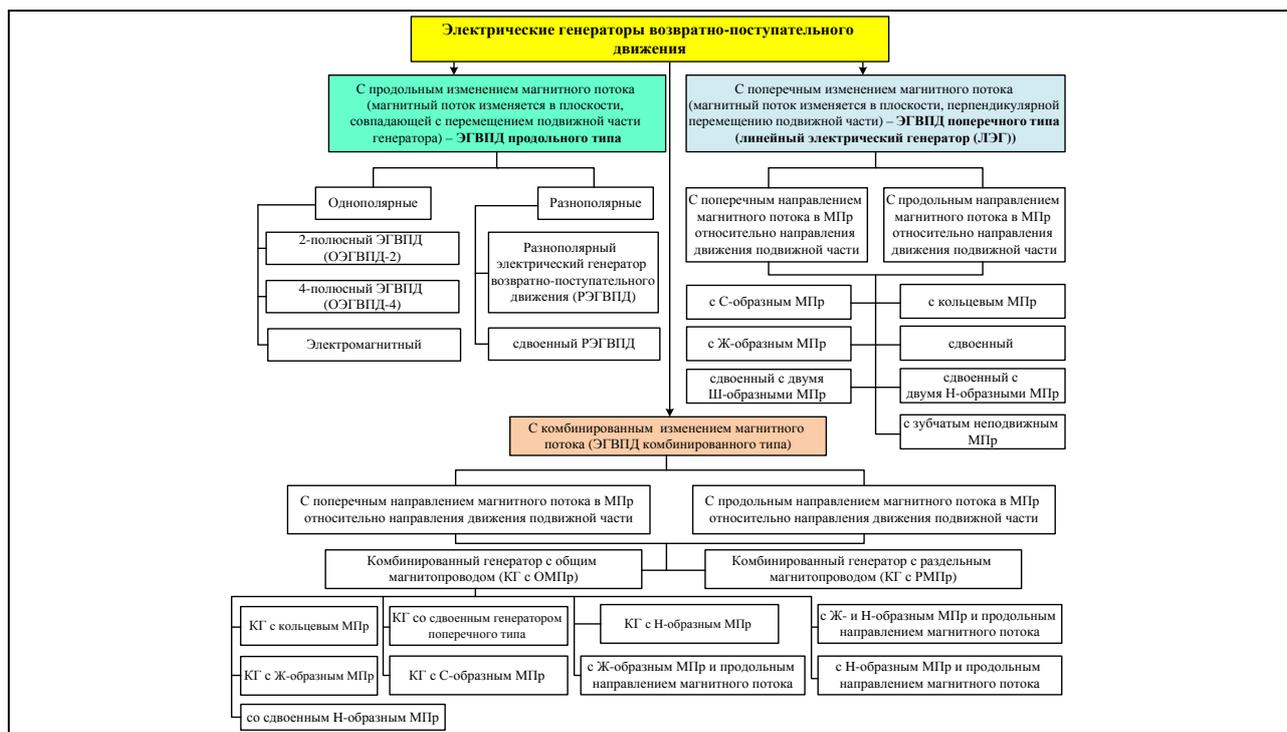


Рис. 1. Классификация ЭГВПД

Литература

- Хитерер, М.Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения : учеб. пособие / М. Я. Хитерер, И.Е. Овчинников. – СПб. : Корона принт, 2013. – 357 с.
- Тракторы XXI века: состояние и перспективы / С.Н. Поддубно [и др.]. – Минск : Беларуская наука, 2019. – 207 с.
- Темнов, Э.С. Разработка теоретических основ расчета и конструирования малоразмерных двигатель-генераторных установок как единой динамической системы : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Э.С. Темнов. – Тула, 2005. – 134 с.
- Менжинский, А.Б. Универсальная методика электромагнитного расчета возвратно-поступательных электрических генераторов с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока / А.Б. Менжинский, А.Н. Малашин, Ю.Г. Коваль // Изобретатель. – 2019. – № 5–6 (233–234). – С. 38–48.
- Силиции, А.П. Совершенствование линейных генераторов с постоянными магнитами для автономных объектов : дис. канд. техн. наук : 05.09.01 / А.П. Силиции. – Самара, 2013. – 124 с.
- Бабилова, Н.Л. К вопросу о классификации линейных электрических генераторов / Н.Л. Бабилова, Р.Р. Саттаров, Е.А. Полихач // Вести. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та. – 2009. – Т. 12, № 2. – С. 144–149.
- Сергеенкова, Е.В. Синхронная электрическая машина возвратно-поступательного движения (генератор) : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Е.В. Сергеенкова. – М 2011. – 118 с.
- Бабилова, Н. Л. Генератор-возвратно поступательного движения в автономной системе электроснабжения маломощных потребителей : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Н. Л. Бабилова. – Уфа, 2009. – 147 с.

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С МНОГОФАЗНОЙ ДРОБНОЙ ЗУБЦОВОЙ ОБМОТКОЙ

Пантелеев С.В., Малашин А.Н., Степанов А.А.
Военная академия Республики Беларусь

Аннотация:

Существующими методами определения индуктивных параметров электрических машин, которые учитывают высшие пространственные гармоники магнитного поля в воздушном зазоре, геометрические параметры магнитной системы, распределение фазных обмоток независимо от числа фаз, являются: метод гармонических проводимостей, метод проводимостей зубцовых контуров, метод интегральных уравнений. Но использование таких подходов в процессе оптимизации синхронных электрических машин с дробными зубцовыми обмотками (СЭМ с ДЗО) с различными соотношениями чисел зубцов на полюс и фазу является слишком трудоемким.

Текст доклада:

Наличие корректной информации об индуктивных параметрах электрической машины необходимо как для разработки адекватной математической модели СЭМ с ДЗО, так и для решения задач синтеза систем управления. Поэтому разработка удобного для процесса оптимизации электрической машины способа определения собственных и взаимных индуктивностей многофазных СЭМ с ДЗО, который учитывает несинусоидальное распределение фазных обмоток в пазах магнитопровода статора и спектр пространственных гармоник магнитного поля в воздушном зазоре, является актуальной задачей.

Для моделирования влияния схемы и параметров обмотки на вращающееся магнитное поле в воздушном зазоре электрической машины используется пространственная обмоточная функция (ПОФ) $Q_n(\phi_s)$. Гармонический состав ПОФ определяет: характер распределения МДС обмотки вдоль воздушного зазора; фильтрующие свойства обмотки как источника ЭДС по отношению к высшим пространственным гармоникам магнитного поля; индуктивные параметры электрической машины.

Производная пространственной обмоточной функции определяет функцию распределения обмотки (ФРО) $D_n(\phi_s)$.

Функция распределения обмотки непрерывна, однако с учетом того, что при увеличении числа фаз m увеличивается число пазов магнитопровода статора z_1 , можно принять допущение о дискретном характере функции распределения и использовать дискретную модель многофазной обмотки электрической машины. Основой для разработки дискретной модели обмотки электрической машины в матричном виде является введение двух матриц: матрицы функции распределения обмотки и матрицы пространственной обмоточной функции:

$$[D] = (d_{kn}) = (\bar{d}_0 \quad \dots \quad \bar{d}_n \quad \dots \quad \bar{d}_{m-1}), \quad k \in [0, z_1 - 1], \quad n \in [0, m - 1], \quad (1)$$

$$[W] = (w_{kn}) = (\bar{w}_0 \quad \dots \quad \bar{w}_n \quad \dots \quad \bar{w}_{m-1}), \quad k \in [0, z_1 - 1], \quad n \in [0, m - 1], \quad (2)$$

где d_{kn} – доля проводников пазы статора k , которая принадлежит фазе n ; \bar{d}_n – вектор распределения обмотки фазы n ; w_{kn} – дискретное значение ПОФ фазы n справа от пазы статора с номером k ; \bar{w}_n – вектор-столбец дискретных значений ПОФ фазы n .

В матрице ФРО (1) компонент k вектора n соответствует дискретному значению функции распределения в пазу статора с номером k . При условии протекания постоянного тока в фазных обмотках, проводники в пазу статора с положительным направлением тока являются прямыми, а

с отрицательным направлением тока – обратными. С учетом этого d_{kn} могут принимать следующие значения: $d_{kn} \in (0,1]$, если это доля прямых проводников; $d_{kn} \in [-1,0)$, если это доля обратных проводников.

Выражение дискретного интегрирования (3) позволяет определить компоненты матрицы пространственной обмоточной функции из матрицы функции распределения обмотки:

$$w_{k,n} = \sum_{g=0}^k d_{g,n} - \frac{1}{z_1} \sum_{j=0}^{z_1-1} \sum_{h=0}^j d_{h,n}, \quad k \in [0 \dots z_1 - 1], n \in [0 \dots m - 1], \quad (3)$$

где $g, j, h \in Z$ – переменные.

На основе известных значений компонентов матриц ФРО и ПОФ можно представить функцию распределения обмотки $D_n(\phi_s)$ и пространственную обмоточную функцию $Q_n(\phi_s)$ для фазы n в дискретной форме:

$$D_n(\phi_s) = \frac{W_{z_1}}{R_s \sigma_s} \sum_{k=0}^{z_1-1} d_{kn} S_{\sigma_s} \left(\phi_s - \frac{\pi}{z_1} - k \frac{2\pi}{z_1} \right), \quad (4)$$

$$Q_n(\phi_s) \approx W_{z_1} \sum_{k=0}^{z_1-1} w_{kn} S_{\tau} \left(\phi_s - k \frac{2\pi}{z_1} \right), \quad (5)$$

где W_{z_1} – количество проводников внутри паза статора (принято равным для всех пазов статора); σ_s – величина открытия паза магнитопровода статора; S_{σ_s} – функция открытия паза магнитопровода статора; $\tau = 2\pi/z_1$ – величина зубцового (пазового) деления статора; S_{τ} – функция зубцового (пазового) деления статора; ϕ_s – угол между началом отсчета и рассматриваемой точкой на статоре; R_s – радиус магнитопровода статора у воздушного зазора.

Выражения (4) и (5) представляют собой аналитическую модель многофазной зубцовой обмотки, которая позволяет с высокой достоверностью определить влияние схемы и параметров обмотки на индуктивные параметры электрической машины при наименьших временных затратах.

С использованием данной модели разработан способ определения индуктивных параметров синхронной электрической машины с многофазной дробной зубцовой обмоткой, который позволяет учесть высшие гармоники индукции магнитного поля в воздушном зазоре и несинусоидальный закон изменения пространственных обмоточных функций.

Проверку адекватности аналитических выражений для определения индуктивных параметров электрической машины корректно проводить в сравнении с результатами расчета посредством магнитостатической векторной модели магнитного поля электрической машины. Расчет значений собственных и взаимных индуктивностей статора рассмотрен на примере девятифазной синхронной электрической машины с двухслойной дробной зубцовой обмоткой с числом пазов на полюс и фазу $q = 2/17$ [1].

В таблице 1 приведены результаты расчета собственных и взаимных индуктивностей статора электрической машины посредством аналитического метода и численного метода конечных элементов.

Таблица 1. – Результаты расчета индуктивностей статора СЭМ с ДЗО

Метод	L_0 , мГн	M_1 , мГн	M_2 , мГн	M_3 , мГн	M_4 , мГн
Аналитический	0,408	0	0	0	0,027
Численный	0,419	0	0	0	0,029

Из таблицы 1 видно, что расхождение результатов, полученных посредством аналитического и численного методов, не превышают 10 %. Это подтверждает адекватность разработанных аналитических выражений для определения индуктивных параметров электрической машины.

Литература

1. Пантелеев, С.В. Повышение энергетических показателей электрической машины путем применения многофазной зубцовой обмотки С.В. Пантелеев, А.Н. Малашин // Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск. – 2017 – №3. – С. 80–86.

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИЙ РЕЖИМ
РАБОТЫ МНОГОФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ**

Пантелеев С.В., Малашин А.Н., Сизиков С.В.
Военная академия Республики Беларусь

Аннотация:

Возможность работы многофазной электрической машины в полигармоническом режиме является одним из преимуществ перед трехфазной электрической машиной. Обеспечение функционирования электрической машины в полигармоническом режиме работы позволит улучшить ее массогабаритные и энергетические показатели. При этом для получения максимальной активной мощности электрической машины необходимо решить задачу согласования во временной области полигармонической ЭДС и тока.

Текст доклада:

Особенности совместного функционирования многофазной электрической машины и полупроводникового преобразователя электрической энергии (ППЭЭ) обуславливают особый подход к синтезу системы управления.

Разработана система векторного управления током в цепи многофазной электрической машины. Для этого на основе проведенного анализа электромагнитных процессов в многофазном ППЭЭ создана его дискретная математическая модель, которая учитывает перераспределение электромагнитной энергии по отдельным пространственным гармоническим составляющим в зависимости от числа фаз.

$$\bar{U}_{h_i} = \bar{U}_{ss,h} + R\bar{I}_{h_i} + L_h \frac{d\bar{I}_{h_i}}{dt}; \quad (1)$$

$$\bar{U}_{ss,h} = \bar{\Phi}_{ih} u_d; \quad (2)$$

$$\bar{\Phi}_{ih} = \frac{1}{2} T^{-1} M T \bar{S}_{ih}; \quad (3)$$

$$i_d = \frac{m}{2} \sum_{h=1}^{(m-1)/2} \bar{\Phi}_{ih} \bar{I}_{h_i}; \quad (4)$$

$$i_d = i_f + i_l. \quad (5)$$

$$i_f = C_d \frac{du_d}{dt} \quad (6)$$

где $\bar{U}_{h_i}, \bar{I}_{h_i}, \bar{U}_{ss,h}$ – векторы-столбцы мгновенных значений сетевых напряжений и токов, а также напряжений на силовом входе ПК в двухмерных ортогональных неподвижных системах координат $\alpha_h \beta_h$, R и L_h – матрицы (размерностью $m \times m$) активных сопротивлений и индуктивности буферных реакторов; $\bar{\Phi}_{ih} = [\varphi_{\alpha_h} \quad \varphi_{\beta_h}]^T$ – дискретные коммутационные вектор-функции; u_d – выходное напряжение ППЭЭ; T^{-1} – матрица преобразования координат; M – матричная константа размерностью $m \times m$; \bar{S}_{ih} – комбинация состояний ключей ПК; i_d – выходной ток ППЭЭ; m – число фаз; i_f – ток в цепи емкостного фильтра C_d ; i_l – ток нагрузки ППЭЭ;

$i = 0 \dots (N-1)$ – номер комбинации состояний ключей ПК; N – общее число допустимых комбинаций состояний ключей ПК.

С использованием данной математической модели и схемы инъекции высших гармоник тока, которая обеспечивает полигармонический режим работы ППЭЭ, разработан способ независимого управления пространственными гармоническими составляющими входного тока преобразователя.

Функциональная схема регулирования ППЭЭ представлена на рисунке 1 и выполнена на основе принципов подчиненного регулирования и векторного управления вектором входного тока \bar{i}_h ППЭЭ.

В разработанной системе управления для обеспечения полигармонического режима работы полупроводникового преобразователя электрической энергии разработана схема инъекции высших гармоник тока (7)-(9).

Заданные значения «активных» составляющих h -го вектора входного тока $i_{x_h}^*(k)$ при $h > 1$ определяются на основе «активной» составляющей вектора входного тока при $h = 1$ с использованием весовых коэффициентов C_h

$$i_{x_h}^*(k) = C_h i_{x_1}^*(k). \quad (7)$$

Весовые коэффициенты C_h рассчитываются на основе значений модулей векторов входного напряжения ППЭЭ $U_h(k)$ согласно выражению

$$C_h = U_h(k) / U_1(k). \quad (8)$$

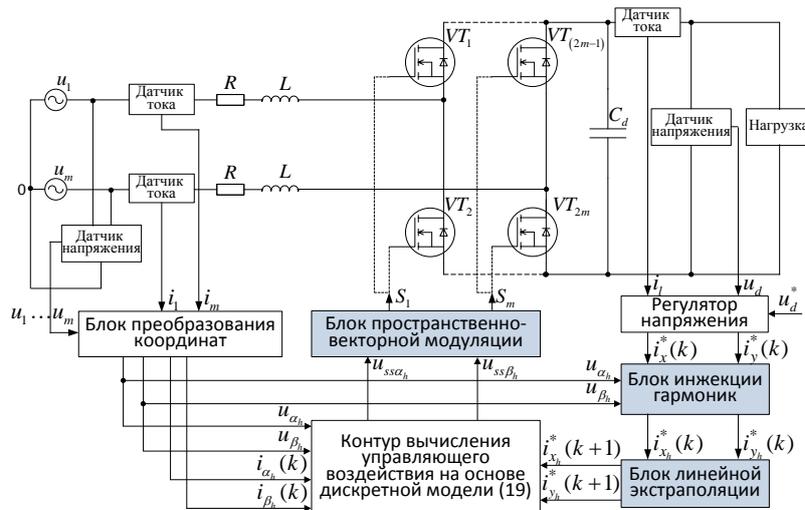


Рис. 1. Функциональная схема регулирования ППЭЭ

При этом заданное значение «активной» составляющей тока $i_{x_1}^*(k)$ определяется как функция полученного регулятором напряжения постоянного тока заданного значения «активной» составляющей тока $i_x^*(k)$:

$$i_{x_1}^*(k) = i_x^*(k) / \sum_{h=1}^{(m-1)/2} C_h. \quad (9)$$

Основой разработанной системы векторного управления ППЭЭ является его дискретная математическая модель изменения мгновенных значений входного тока (1). На ее основе в начале каждого периода управления определяется управляющее воздействие в виде векторов напряже-

ния полупроводникового преобразователя электрической энергии, позволяющих компенсировать отклонение вектора входного тока ППЭЭ в конце периода управления.

Формирование в каждой из фаз полигармонических токов, сопряженных по форме и фазе с питающим преобразователь напряжением, осуществляется посредством управляющих воздействий в виде векторов напряжения полупроводникового коммутатора, реализация которых осуществляется методом многофазной пространственно-векторной модуляции.

Для проверки разработанных положений создана имитационная модель девятифазного ППЭЭ с системой векторного управления [1]. Результаты исследования модели подтвердили адекватность разработанных технических решений, применение которых позволит обеспечить наиболее полную реализацию собственных преимуществ многофазной электрической машины в целях общего улучшения массогабаритных и энергетических показателей автономной системы электроснабжения.

Литература

1. Пантелеев С.В. Разработка математической модели многофазного полупроводникового преобразователя электрической энергии с системой векторного управления. Часть 1 / С.В. Пантелеев, А.Н. Малашин // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель. – 2020 – № 2. – С. 82–90.

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ АКТИВНОГО СИЛОВОГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Первенёнок Р.Е., Сицко А.Л., Каледа А.Е.
Военная академия Республики Беларусь

Аннотация:

Современная силовая электроника позволяет создавать системы коррекции качества питающего напряжения на основе параллельных активных фильтров (АФ).

Текст доклада:

Принцип действия АФ основан на анализе гармоник тока или напряжения нелинейной нагрузки и генерации в систему электроснабжения таких же гармоник тока или напряжения, но с противоположной фазой. Основное отличие разрабатываемых систем заключается в применяемых алгоритмах определения параметров тока компенсации, которые зачастую имеют высокую стоимость технической реализации и сложную систему управления. Качество компенсации зависит от применяемого метода формирования задающих воздействий на силовую часть.

Процесс синхронизации важен для систем компенсации, так как ошибки синхронизации могут значительно снизить эффективность работы системы или даже привести к аварии. В большинстве случаев устройство синхронизации находится вне замкнутого контура регулирования системы управления АФ, и поэтому любой дестабилизирующий фактор со стороны напряжения системы электроснабжения приводит к отклонению ее выходных характеристик.

В последние годы значительное внимание уделяется разработке методов управления, основанных на использовании нейронных сетей.

Для адаптивной системы фазовой синхронизации была применена адаптивная линейная нейронная сеть – Адалине (Adaptive linear neuron), предложенная Б. Уидроу [1].

Структура адаптивной линейной нейронной сети (АЛНС) представлена на рисунке 1. Первым этапом выделения высших гармоник АЛНС является генерация входного вектора X . Этот вектор состоит из комбинации синусоидальных и косинусоидальных составляющих тока или напряжения на частоте основной и высших гармоник. Далее измеряется ток нелинейной нагрузки и подается в качестве целевого сигнала. Затем настраиваются весовые коэффициенты w . Во время каждой итерации выход АЛНС сходится к целевому сигналу, постоянно обновляя весовые коэффициенты с помощью алгоритма обучения. В конечном итоге, после достаточного количества итераций, АЛНС будет сходиться с минимально допустимой ошибкой. Таким образом, можно выделить высшие гармоники тока и напряжения.

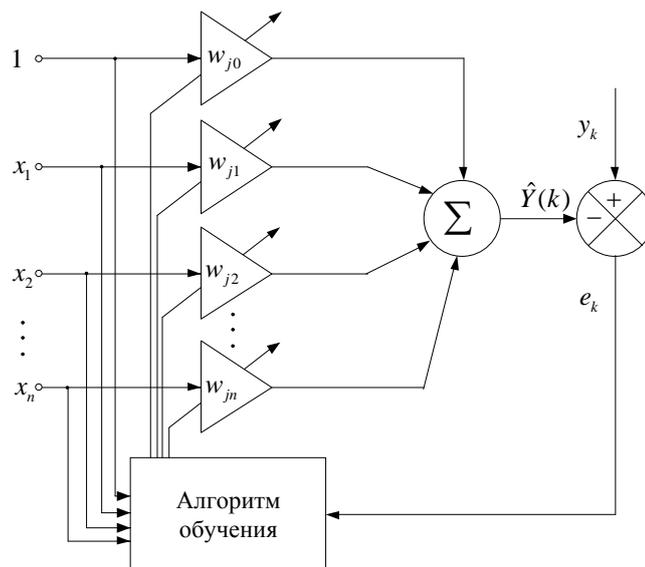


Рис.1. Структура адаптивной линейной нейронной сети

Результаты имитационного моделирования АФ с адаптивной системой синхронизации позволяют сделать вывод о том, что ошибка оценки фазы менее 0,5 градуса, что лучше по сравнению с уже существующими способами. Эффективность применения адаптивной системы синхронизации в системе управления, дает возможность оперативно реагировать на динамические изменения нагрузки, что характерно для работы современного функционального оборудования. Вычисления возможно проводить в режиме реального времени.

Литература:

1. Уидроу, Б. Адаптивная обработка сигналов: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.

КАПИТАЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ НА СООРУЖЕНИЕ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Короткевич М.А., Подгайский С.И.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Установлено, что при увеличении стоимости силового трехжильного электрического кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6...35кВ по сравнению со стоимостью такого же кабеля с бумажно-масляной изоляцией до двух раз, стоимость сооружения кабельной линии с кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена возрастает не более, чем в 1,5 раза.

Снижение (до 20 %) расчетной стоимости сооружения кабельной линии напряжением 6...35 кВ с одножильными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена можно достичь при учете большей их пропускной способности (за счет больших значений длительно допустимых токов нагрузки и снижения на этой основе на одну ступень требуемой площади поперечного сечения токопроводящих жил) по сравнению с трехжильным и кабелями с бумажно-масляной изоляцией.

Текст доклада:

Капитальные затраты на сооружение кабельных линий электропередачи $K_{к.л}$ известной площади поперечного сечения жилы состоят из затрат на приобретение кабеля и линейной арматуры (соединительных и концевых муфт) $K_к$ и затрат на их прокладку $K_п$, т. е.

$$K_{к.л} = K_к + K_п \quad (1)$$

В суммарной стоимости сооружения кабельных линий с кабелями с бумажно-масляной изоляцией, стоимость кабелей составляет [2];

43...53 % (в среднем 48 %) – для линий напряжением 6...10 кВ;

23...52 % (в среднем 37,5 %) – для линий напряжением 20 кВ [3];

57...58 % (в среднем 57,5 %) – для линий напряжением 35 кВ;

30 % – для линий напряжением 110 кВ с маслонаполненными одножильными кабелями низкого давления [2].

Можно считать, что затраты на прокладку и монтаж трехжильных кабелей с бумажно-масляной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена одной и той же площади поперечного сечения жил одинаковы, т. е. стоимости кабельных линий различаются лишь стоимостями самих кабелей. Тогда из уравнения (1) для кабелей с комбинированной изоляцией имеем:

$$K_п = K_{к.л} - K_к = K_к \left(\frac{K_{к.л}}{K_к} - 1 \right) = K_к (\alpha_1 - 1), \quad (2)$$

где $\alpha_1 = K_{к.л} / K_к$ – коэффициент, учитывающий во сколько раз стоимость всей кабельной линии превышает стоимость собственно кабеля; значение α_1 равно 2,08; 2,66; 1,74; 3,3 соответственно для кабельных линий с бумажно-масляной изоляцией напряжением до 10,20; 35 к 110 кВ. Капитальные затраты на сооружение кабельной линии электропередачи с трехжильными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена $K_{к.л}^п$ запишутся как

$$K_{к.л}^n = K_k^n + K_k (\alpha_1 - 1) = K_k \left(\frac{K_k^n}{K_k} + (\alpha_1 - 1) \right) = K_k (\alpha_2 + \alpha_1 - 1)$$

где $\alpha_2 = K_k^n / K_k \geq 1$ - коэффициент, учитывающий увеличение стоимости кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению со стоимостью кабеля скомбинированной изоляцией.

Отношение капитальных затрат на сооружение кабельных линий с трехжильными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена к капитальным затратам на сооружение кабельных линий с кабелями с бумажно-масляной изоляцией имеет вид:

$$\frac{K_{к.л}^n}{K_{к.л}} = \frac{K_k (\alpha_1 + \alpha_2 - 1)}{K_k + K_k (\alpha_1 + 1)} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2 - 1)}{\alpha_1} = 1 + \frac{\alpha_2 - 1}{\alpha_1} \quad (4)$$

По формуле (4) было установлено, что увеличение стоимости кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению со стоимостью кабеля с бумажно-масляной изоляцией в 1,2, 2,0 раза приведет к увеличению стоимости сооружения линий с кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена в 1,1, ..., 1,48; 1,07, ..., 1,37; 1,11, ..., 1,57 раза соответственно для линий напряжением 6...10; 20; 35 кВ.

При сопоставлении капитальных затрат на сооружение кабельной линии с одножильными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена и трехжильными кабелями с бумажно-масляной изоляцией необходимо иметь ввиду различную степень удобства прокладки кабеля указанных видов. Следует отметить, что сооружение кабельной линии с одножильным кабелем требует раскатки не одного, а трех кабелей, укладки их (по треугольнику или в плоскости) и закреплении в данном положении.

Стоимость прокладки в земляной траншее трехжильных кабелей с бумажно-масляной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 6...35кВ примерно равна стоимости самих кабелей, а напряжением 110кВ – превышает стоимость кабелей в 2,0 раза [1,2]. Стоимость монтажа кабельной линии с одножильным кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена примерно в два раза превышает стоимость самого кабеля.

Следовательно, стоимость сооружения кабельной линии можно представить, как

$$K_{к.л}^n = K_k^n + K_n = K_k^n \left(1 + \frac{K_n}{K_k^n} \right) = K_k^n (1 + \alpha_3),$$

где $\alpha_3 = \frac{K_n}{K_k^n} \geq 1$ – коэффициент, указывающий во сколько раз стоимость прокладки кабеля

превышает стоимость самого кабеля; значение α_3 равно 1,0 (для линий с трехжильными кабелями с бумажно-масляной изоляцией) и 2,0 (для линий с одножильными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена)

Оказалось, что стоимость сооружения кабельной линии с одножильным кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена может превышать стоимость сооружения кабельной линии с трехжильным кабелем с бумажной пропитанной изоляцией в 1,8...3,0 раза.

Таким образом существенные расходы по сооружению кабельной линии составляют расходы на прокладку кабелей.

Литература

1. Огороков, В.Р. Управление электрическими системами / В.Р. Огороков. Л .: ЛГУ, 1976. – 224 с.
2. Козлов, В.А. Электроснабжение городов / В.А. Козлов. Л.: Энергия, 1977. – 280 с.
3. Майоров, А.В. К обоснованию и выбору параметров кабельных линий 20 кВ в мегаполисе / А.В. Майоров, А.В. Шунтов// Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып.66. Актуальные проблемы надежности больших систем энергетики. – Минск: Бел. Национ. техн. ун-т, 2015. – С.125–132.

УДК 621.315

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
ЦИФРОВЫХ ЗАЩИТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Новаш И.В., Румянцев В.Ю., Дерюгина Е.А.,
Алехнович А.С., Бзей Аббас
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Рассмотрен компьютерный программный комплекс в системе динамического моделирования MatLab, предназначенный для проведения испытаний цифровых защит асинхронных двигателей (АД) при различных рабочих и аварийных режимах двигателя и питающей сети.

Текст доклада:

Для исследования функциональных свойств релейных защит АД разработана в системе динамического моделирования (СДМ) MatLab-Simulink структурная модель узла питания собственных нужд электростанции с асинхронным двигателем, позволяющая выполнять расчеты токовых сигналов трансформаторов тока, установленных в системе электропитания АД.

На рисунке 1 представлена модель узла питания собственных нужд электростанции с асинхронным двигателем. В разработанной схеме используется модель трехфазной группы трансформаторов тока (СТ), позволяющая получать сигналы токов вторичных обмоток трансформаторов тока с учетом насыщения магнитопроводов трансформаторов тока [1].

Модель узла питания асинхронного двигателя совместно с моделью его релейной защиты представляет компьютерный испытательный комплекс (КИК) для исследования функциональных свойств моделей релейных защит АД. Разработанный КИК позволяет рассчитывать токи вторичных обмоток трехфазной группы трансформаторов тока (СТ) для рабочих и аварийных режимов с учетом насыщения магнитопроводов трансформаторов тока и подавать их на входы блока цифрового устройства исследуемой защиты «Модель релейной защиты АД».

На рисунках 2 и 3 представлены результаты моделирования внезапного симметричного снижения напряжения на АД, при трехфазном коротком замыкании (КЗ) на питающих шинах двигателя. Трехфазное КЗ моделируется с помощью блока *ThreePhaseBreaker*, который представлен на схеме блоком *BreakerKZ*. Данный блок создает симметричное трехфазное КЗ в период времени с 1,2 до 1,4 с, при полном интервале расчета, равном 1,8 с. Режим сопровождается падением напряжения в питающей сети, частоты вращения АД, возрастанием пусковых токов при повторном запуске АД.

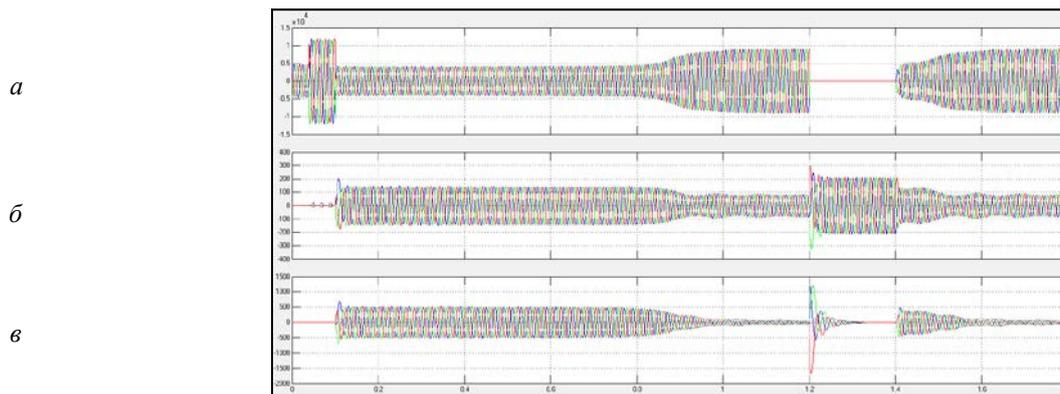


Рис. 2. Режим трехфазного КЗ. Графики:
a – линейные напряжения на выходе силового трансформатора,
б – линейные токи на стороне высокого напряжения силового трансформатора, *в* – линейные токи двигателя

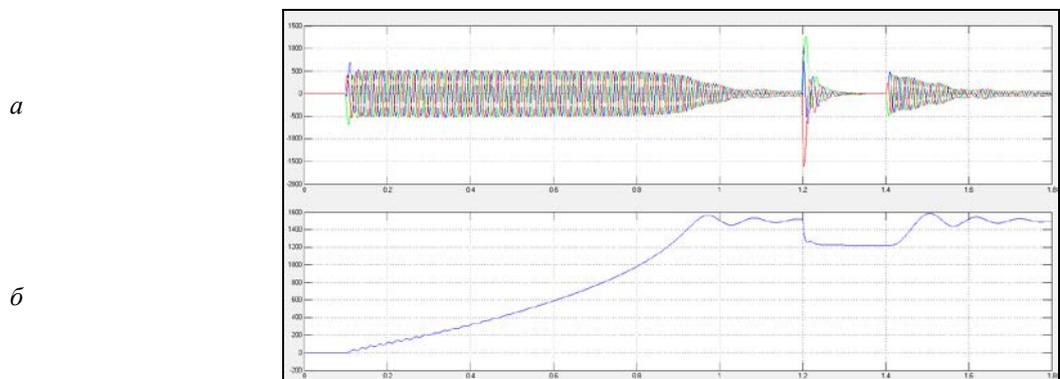


Рис. 3. Режим трехфазного КЗ. Графики:
a – токов статора, *б* – частоты вращения ротора АД

Литература

1. Новаш, И.В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И.В. Новаш, Ю.В. Румянцев // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2015. – № 5. – С. 23–38.

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Новаш И.В., Мешкова А.Н., Арутюнов М.А.,
Гаврилов Д.А., Хитев Н.Р., Рябцев И.А., Климович П.И.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Рассмотрены возможности 3D-моделирования при решении задач электротехники, в частности, при расчетах сложных электрических цепей, резистивных цепей, установившихся режимов однофазных и трехфазных электрических цепей, а также при расчете переходных режимов в электрических цепях. Выполнено сопоставление результатов расчета, полученных в среде вычислительной математики MathCAD и в системе динамического моделирования Simulink MatLab.

Текст доклада:

В современном мире 3D-моделирование приобретает все большее значение. Оно применяется в сфере маркетинга, архитектуры, дизайна, индустрии компьютерных игр и промышленности. В наше время благодаря компьютерному трехмерному моделированию появилась удивительная возможность создавать объемную модель объекта (3D-модель). Она наиболее полно описывает объект, позволяет увидеть конструкцию со всех сторон. Презентация на основе 3D-модели производит яркое впечатление.

При изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники» может быть использована разработанная в этой работе база 3D-моделей реальных электротехнических изделий с геометрическими размерами, принятыми из технической документации на оцифровываемые образцы. На рисунках 1–4 приведены примеры созданных 3D-моделей элементов электрических цепей, коммутационных и измерительных приборов.



Рис. 1. Катушка индуктивности: *a* – реальное изделие; *б* – 3D-модель

Представленные 3D-модели реальных электротехнических изделий показывают, что 3D-моделирование позволяет достичь очень высокой степени детализации объектов, передать их натуральную величину, оценить проекты будущих схем в трехмерном изображении, а также, используя разработанную базу изделий, позволяет в короткие сроки собрать практически любую электрическую цепь и провести ее анализ.

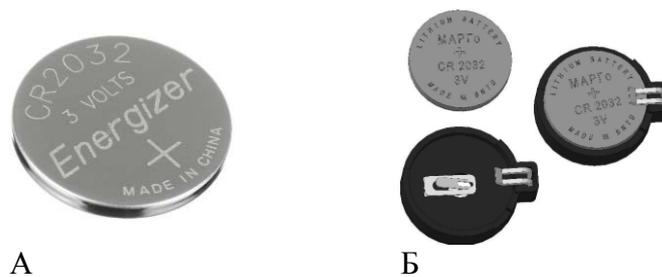


Рис. 2. Источник постоянного напряжения (батарея):
a – реальное изделие; *б* – 3D-модель

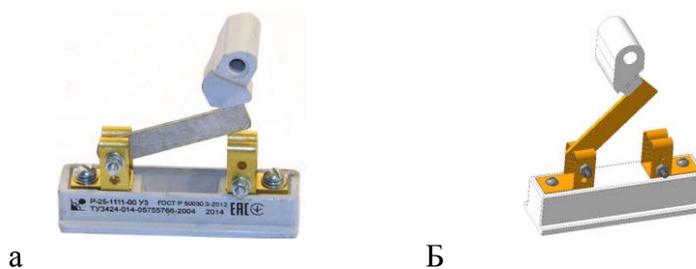


Рис. 3. Рубильник: *a* – реальное изделие; *б* – 3D-модель

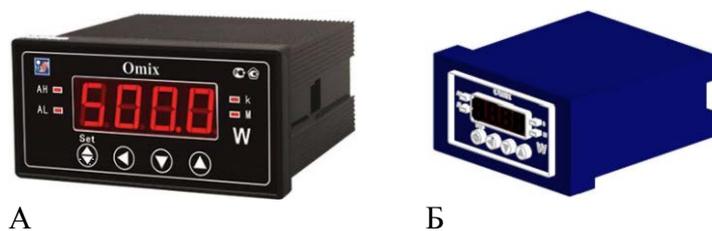


Рис. 4. Ваттметр: *a* – реальное изделие; *б* – 3D-модель

3D-модели трехфазной цепи (рисунок 5) созданы с использованием системы трехмерного проектирования КОМПАС-3D. На верхнем рисунке представлена схема с объемным отображением элементов в соответствии с их условно-графическим обозначением. На нижнем рисунке – 3D-модель схемы с разработанными объемными элементами электротехнических изделий и приборов.

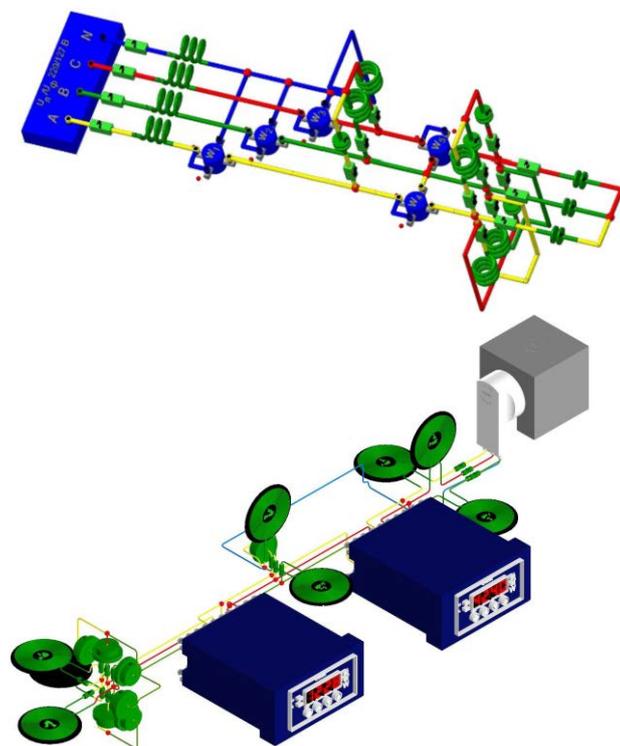


Рис. 5. Варианты представления трехфазной цепи

Литература

1. РКС Компоненты [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.rcscomponents.com/product/WT505090-20K2-A10-G.html>. – Дата доступа : 10.11.2020.
2. КИП Сервис [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://kip-ural.su/p77870501-vattmetr-tsifrovoy-omix.html>. – Дата доступа : 10.11.2020.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ДЛЯ ГИБКИХ ПРОВОДНИКОВ ВЛ И ОРУ

Пономаренко Е.Г., Климкович П.И., Баран А.Г.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

В связи с возможностью увеличения уровня тока короткого замыкания в узлах генерации и на электрических подстанциях возникает необходимость расчета электродинамической стойкости гибких проводников. Для решения этой задачи авторами модифицирован алгоритм компьютерной программы, что в итоге позволило получить значение токов электродинамической стойкости.

Текст доклада:

В настоящее время в энергосистеме Республики Беларусь расчетные уровни токов КЗ достигли значительных величин. Так, например, по данным РУП «Белэнергосетьпроект» на шинах электрических подстанций 110 кВ в районе г. Гомеля расчетные токи КЗ достигают 40 кА, а в районе г. Минска – 50 кА и более.

В связи с введением в строй Белорусской АЭС в энергосистеме Республики Беларусь следует ожидать изменения уровней токов короткого замыкания по отношению к существующим расчетным уровням токов. Это связано с тем, что новая АЭС будет представлять в схеме энергосистемы новый значительный узел генерации. Наибольшее увеличение токов КЗ ожидается в узлах, расположенных ближе к АЭС. Более существенно на напряжении 330 кВ, чем на 110 кВ. Более конкретных выводов в настоящее время сделать нельзя, поскольку режим работы энергосистемы после введения в строй АЭС широкой общественности неизвестен. Однако с уверенностью можно сказать, что для тех распределительных устройств электростанций и подстанций, где произойдет увеличение токов КЗ, следует провести оценку надежности работы объектов в изменившихся условиях работы. Одним из параметров, которые подлежат проверке, является электродинамическая стойкость токоведущих конструкций, которые могут быть не рассчитаны на увеличение токов КЗ.

Поскольку, как уже отмечено ранее, конкретные значения токов КЗ после ввода АЭС неизвестны, можно подойти к решению вопроса оценки электродинамической стойкости, с другой стороны. А именно, определить токи электродинамической стойкости типовых пролетов распределительных устройств, поскольку большинство подстанций в Республике Беларусь выполнено по типовым проектам.

После обобщения полученных данных ими смогут воспользоваться соответствующие проектные или эксплуатирующие организации для выявления необходимости проведения мероприятий по повышению электродинамической стойкости конкретного объекта.

Для выполнения сформулированной задачи использованы предыдущие разработки кафедры «Электрические станции», в частности, компьютерная программа FLEBUS. Авторами был расширен ее функционал и внесены соответствующие дополнения в программный алгоритм.

Для определения тока электродинамической стойкости пользователь имеет возможность ввести не конкретное значение тока короткого замыкания, а диапазон токов для которого должен производиться расчета с определенным шагом ΔI . Каждое последующее значение тока определяется выражением

$$I_j = I_{j-1} + \Delta I.$$

Ток I_j , при котором будет выполняться условие

$$A_{\phi-\phi.\min} = A_{\phi-\phi.\text{доп}} ,$$

где $A_{\phi-\phi.\min}$ и $A_{\phi-\phi.\text{доп}}$ – соответственно расчетное минимальное и допустимое отклонение проводников, будет считаться ток электродинамической стойкости $I_{\text{эд}}$ для пролета с гибкими проводниками.

Значение $I_{\text{эд}}$ определяется автоматически. Разработанная компьютерная программа опробована с использованием экспериментальных данных.

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ГИБКОЙ ОШИНОВКИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Пономаренко Е.Г., Баран А.Г., Васильева А.А.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Приведены мероприятия по повышению электродинамической стойкости гибкой ошиновки распределительных устройств. Методом вычислительного эксперимента определены оптимальные сочетания и места установки междуфазных распорок.

Текст доклада:

Уровни токов короткого замыкания (КЗ) в сетях 110 кВ Белорусской энергосистемы уже значительно превышают нормируемый ток в 20 кА. Например, расчетный ток трехфазного КЗ на сборных шинах Минской ТЭЦ-4 после ввода в эксплуатацию БелАЭС составит более 45 кА. Поэтому для Белорусской энергосистемы необходимо исследовать способы повышения электродинамической стойкости пролетов с гибкой ошиновкой и, в особенности, на стороне 110 кВ.

При выполнении исследований методом вычислительного эксперимента установлено, что токи электродинамической стойкости гибкой ошиновки 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 распределительных устройствах (РУ) приведет к увеличению 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.

В ЗРУ с гибкой ошиновкой для ограничения колебаний сборных шин применяются V-образные гирлянды изоляторов [1], конструкция которых ограничивает отклонения зажимов. Более эффективно применение V-образных стержневых изоляторов [1]. Однако, такие технические решения применимы лишь для ЗРУ, где длина пролетов невелика.

При токах КЗ более 40 кА механические усилия и смещения проводов могут оказывать решающее влияние на конструктивное выполнение гибкой ошиновки как с одиночными проводами, так и с расщепленными фазами. В связи с этим возникла необходимость разработки и использования конструктивных элементов, повышающих электродинамическую стойкость гибких шин РУ. Одним из таких элементов является устройство контроля натяжения провода [2] (рисунок 1).



Рис. 1. Устройство контроля натяжения провода [2]

Приведенный в [3] анализ работы устройства контроля натяжения провода показал, что необходимо определить оптимальное значение его упругой жесткости, при которой геометрические размеры гибкой ошиновки будут находиться в допустимых габаритах при КЗ, а максимальные тяжения при КЗ не превысят допустимых значений.

Одним из решений по увеличению тока электродинамической стойкости, не требующим больших материальных и временных затрат, является установка междуфазных распорок на основе полимерных стержневых изоляторов (рисунок 2). Данное мероприятие можно применять как во вновь сооружаемых, так и в существующих РУ и ВЛ 10–750 кВ.

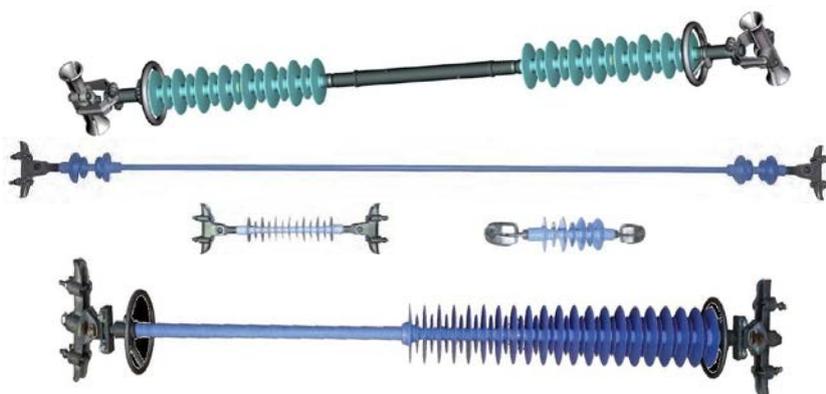


Рис. 2. Междуфазные распорки

Результаты вычислительного эксперимента показывают, что установка одной междуфазной распорки в середине пролета значительно повышает электродинамическую стойкость пролета, а применение двух и более распорок может полностью исключить возможность недопустимого сближения гибких шин при любых возможных токах КЗ. Количество и место установки распорок должны определяться расчетом для каждого конкретного пролета. Такую возможность дает компьютерная программа FleBus.

Анализ результатов вычислительного эксперимента для типового пролета РУ 330 кВ длиной 44 м показывает, что:

- сближение проводов не достигает предельно-допустимых значений даже при установке одной междуфазной распорки;
- установка одной междуфазной распорки в середине пролета ограничивает величину максимального тяжения до 1800 даН.

Анализ результатов вычислительного эксперимента для типового пролета РУ 330 кВ длиной 77,5 м показывает, что:

- сближение проводов также не достигает предельно-допустимых значений даже без установки междуфазных распорок;
- установка одной междуфазной распорки в середине пролета ограничивает величину максимального тяжения на 9–25 % (в зависимости от продолжительности КЗ), а установка двух распорок ограничивает величину максимального тяжения до 42 % (в зависимости от продолжительности КЗ). Максимальное тяжение без установки междуфазных распорок в пролете составляет 4700 даН, при установке одной распорки – 3000 даН, при установке двух – 2750 даН.

Расчеты показали, что для обеспечения электродинамической стойкости пролета достаточно одного комплекта распорок, установленного в середине пролета. Однако для создания запаса стойкости и для снижения максимальных тяжений целесообразно установить два комплекта распорок в каждой трети пролета.

Установка междуфазных распорок рекомендуется для ограничения сближения сборных шин и спусков соседней фазы в шинных пролетах между шинами и отпайками к аппаратам. Недопустимого сближения отпайки и соседней фазы не происходит даже при больших токах КЗ. Для пролетов данного типа междуфазные распорки должны быть установлены между отпайкой левой и средней фаз и соответствующими фазными проводами.

Литература

1. Сергей, И.И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И.И. Сергей, М.И. Стрелюк. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.
2. Защита воздушных распределительных линий от механических перегрузок. Защита анкерных креплений и траверс. Устройство контроля натяжения проводов (ДАС) OMEGA. – Saint Martin la Plaine : Dervaux Distribution, 2012. – 4 с.
3. Сергей, И.И. Оценка эффективности устройства ограничения тяжений проводов при коротком замыкании / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко, Я. В. Потачиц // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2017. – № 4. – С. 309–319.

НАСТРОЙКА КОРРЕКТОРА ТУРБИННОГО РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ

Артёменко К.И.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Правильная настройка регуляторов системы автоматического управления мощностью энергоблока позволяет существенно улучшить качество регулирования и повысить эффективность работы энергоблоков в частности и всей станции в целом в широком диапазоне изменения нагрузок, что позволит привлечь энергоблоки тепловых электрических станций к нормированному первичному регулированию частоты и перетоков активной мощности в энергосистеме.

Текст доклада:

Корректор турбинного регулятора мощности (ТРМ) представляет собой пропорциональное звено с коэффициентом усиления α [1], который может принимать следующие значения: $W_{КТРМ} = \alpha = 1; 3; 5; 7$.

По своей сути коэффициент усиления корректора ТРМ представляет собой ту долю ошибки регулирования по мощности с выхода измерительного блока котельного регулятора мощности (КРМ) [2], которая попадает на вход турбинного регулятора мощности.

Для того, чтобы показать, как коэффициент усиления корректора ТРМ влияет на прямые показатели качества (ППК) переходных процессов при скачкообразном изменении задания системе автоматического управления мощностью энергоблока (САУМБ), рассмотрим режим переменного (скользящего) давления пара перед турбиной.

В режиме переменного давления пара перед турбиной положение регулирующих клапанов $h_{рк}$ достигает заданного значения $h_{зд}$, что соответствует полному закрытию последних по номеру регулирующих клапанов и полному открытию клапанов с предшествующими номерами [3]. Т. е. в режиме скользящего давления пара положение клапанов поддерживается в заданном значении ($h_{рк} = h_{зд}$), а изменение мощности достигается изменением давления перегретого пара перед турбиной. Первым вариантом настройки корректора ТРМ будет коэффициент усиления $\alpha = 1$; вторым – $\alpha = 3$; третьим – $\alpha = 5$; четвертым – $\alpha = 7$. Математическое моделирование переходных процессов в САУМБ для четырех различных вариантов настройки корректора ТРМ производилось при увеличении заданной мощности $N_{зд}$ с 40 % номинальной мощности до 50 % [4]. На основании данных, полученных при математическом моделировании, определим ППК переходных процессов и сведем их в таблицу 1.

Таблица 1. – ППК сравниваемых вариантов параметров динамической настройки корректора ТРМ САУМБ

Вариант	t_5 , % с	t_p , с	σ_m , %	B_T^{M*} , о.е.	p_0^{M*} , о.е.	$h_{рк}^M$, %
1	68	280	0	1,62	1,04	+ 9,3
2	36	420	0	1,3	1,1	+ 24,7
3	17	450	0	1,12	1,15	+ 36,7
4	10	375	0	1,21	1,19	+ 46,5

Примечания: t_5 – время отработки половины регулировочного диапазона (5 % номинальной мощности); t_p – время вхождения регулируемой величины в зону нечувствительности САУМБ (± 1 % от номинальной мощности энергоблока); σ_m – максимальное перерегулирование; B_T^{M*} – максимальное относительное изменение расхода топлива (отношение максимального значения расхода топлива к установившемуся значению); p_0^{M*} – относительное изменение давления перегретого пара перед турбиной (отношение максимального значения к установившемуся); $h_{рк}^M$ – максимальное перемещение регулирующих клапанов турбины.

При скачке задания полное время регулирования, меньшее требуемых 300 секунд [4], обеспечивает только первый вариант; время отработки половины регулировочного диапазона меньше требуемых 15 секунд [4] только у варианта 4. Перемещение регулирующих клапанов турбины у варианта 2 больше на 15,4 % по сравнению со первым, у варианта 3 – на 27,4 %, у варианта 4 – на 37,2 %. Наименьший относительный расход топлива у третьего варианта. Наименьшее относительное изменение давления перегретого пара перед турбиной имеет первый вариант настройки.

Налицо значительное ухудшение ППК в режиме переменного давления пара перед турбиной по сравнению с режимом постоянного давления. Улучшения ППК в данном режиме можно добиться правильной настройкой формирователя сигнала задания и дифференциатора инвариантности.

Очевидно, что корректор ТРМ в режиме постоянного давления пара перед турбиной необходимо использовать с коэффициентом усиления $\alpha = 5$, т. к. именно при нем САУМБ обладает наименьшим расходом топлива, т. е. будет наиболее экономична.

Литература

1. Методика оценки предельных возможностей типовой системы автоматического управления мощностью энергоблока / Г.Т. Кулаков [и др.] // Глобальная энергетика: партнерство и устойчивое развитие стран и технологий: сборник научно-практической конференции в рамках Форума проектов программ Союзного государства – VI Форума вузов инженерно-технологического профиля, Минск, 24–28 октября 2017 г. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 161–164.

2. Артёменко, К. И. Структурно-параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в широком диапазоне изменения нагрузок = Structure-and-Parametric Optimization for Automatic Control System of Power Units of 300 MW in Wide Range of Load Change / К. И. Артёменко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – № 5. – С. 459–471.

3. Инструкция по эксплуатации АРМБ дубль-блоков: И-ТЭ.48 – 2017. ЦТАИ. – Введ. 2017.05.16. – Новолукомль : РУП «Витебскэнерго» филиал Лукомльская ГРЭС, 2017. – 30 с.

4. Нормы участия энергоблоков тепловых электростанций в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности: СТО 59012820.27.100.002-2013. - Введ. 2013.04.25. – М. : ОАО «СО ЕЭС», 2013. – 36 с.

**МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА
РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК
НА КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

Потачиц Я.В.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Разработан численный метод расчета электродинамической стойкости конструктивных элементов распределительных устройств, в котором гибкие проводники вместе с конструктивными элементами рассматривается как единая колебательная система при КЗ.

Текст доклада:

Гибкие проводники представляются гибкой упругой нитью, динамика которой при КЗ описывается уравнением движения, записанным в векторно-параметрической форме:

$$T \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2} + \frac{\partial T}{\partial S} \cdot \frac{\partial \bar{R}}{\partial S} + \bar{f} = \rho \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где \bar{R} – мгновенное значение радиус-вектора, описывающего пространственное расположение провода, м; T – динамическое тяжение провода, Н; \bar{f} – вектор удельного электродинамического усилия, действующего на единицу длины провода, Н/м; ρ – масса единицы длины провода, кг/м.

Конструктивные элементы представляются упругим стержнем с равномерно распределенной массой и постоянной жесткостью по длине. Один конец стержня жестко закреплен, на второй действуют динамические силы, обусловленные тяжениями в проводах.

В общем случае на опорные изоляторы действуют силы, равные:

$$P_i = T_i + N_i, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

где T_i – векторы тяжения в точках крепления провода к изоляторам;

N_i – реакции связей, заменяющие действие проводов смежных пролетов.

Под действием составляющих динамической силы по осям x и y опорный изолятор совершает вынужденные поперечные колебания

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ГИБКОЙ ОШИНОВКОЙ

Потачиц Я.В.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Для анализа электродинамической стойкости необходимо провести частотный анализ вынужденных колебаний. В качестве возбудителя вынужденных колебаний, в данном случае, выступают подвижные элементы конструкции – токоведущие части открытого распределительного устройства.

Текст доклада:

С помощью разработанной на кафедре «Электрические станции» БНТУ компьютерной программы FLEBUS 2.0 были получены характерные осциллограммы динамических усилий в результате моделирования двухфазного КЗ величиной 30 кА в ячейке типового ОРУ 110 кВ. Также, методом регрессивного анализа была получена функция, описывающая кривую динамических усилий и для ее частотного анализа применялось стандартное разложение в ряд Фурье на интервале от 0,53 до 0,7 с.

В ходе выполнения исследования был произведен расчет собственной частоты колебаний конструктивных элементов типового распределительного устройства 110 кВ. А именно: опорного изолятора, силового выключателя, измерительного трансформатора тока. Параметры элементов приняты по конструктивным чертежам реально действующих объектов, на которых на данный момент проводится реконструкция распределительных устройств.

В динамических расчетах всегда необходимо определять частоту свободных колебаний и сравнивать ее с частотой вынуждающей силы. Необходимо чтобы частота вынужденных колебаний была меньше частоты свободных колебаний. Для соблюдения этого условия обычно изменяют частоты свободных колебаний, поскольку, частоту вынужденных колебаний в большинстве случаев изменить нельзя. Как показал вычислительный эксперимент, на величину частот собственных колебаний конструктивных элементов можно влиять путем изменения их механических и геометрических параметров. Например, частота собственных колебаний опорного изолятора увеличивается при увеличении жесткости материала корпуса или уменьшении высоты изолятора.

ФОРМИРОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ

Романюк Ф.А., Румянцев В.Ю., Румянцев Ю.В., Дерюгина Е.А.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Предложен алгоритм компенсации колебаний ортогональных составляющих выходных сигналов цифровых фильтров, реализованных на основе дискретного преобразования Фурье, при отклонении частоты входного сигнала от номинальной.

Текст доклада:

В микропроцессорных защитах используются цифровые фильтры (ЦФ) на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) в силу простоты их реализации и устойчивости функционирования.

При возникновении короткого замыкания (КЗ) сигнал, контролируемый микропроцессорной защитой, характеризуется наличием одновременно одной или нескольких особенностей: содержит апериодическую составляющую, имеет частоту, отличную от номинальной, и искаженную форму вследствие насыщения измерительных трансформаторов, что приводит к погрешностям функционирования ЦФ. В частности, при отклонении частоты входного сигнала от номинальной на выходе ЦФ формируется сигнал в виде незатухающего колебательного процесса. Это объясняется тем, что частота дискретизации аналогового сигнала выбирается исходя из условия получения целого числа выборок на период основной частоты, а при ее отклонении данное условие нарушается. Для устранения этого недостатка используются специализированные алгоритмы, которые обеспечивают функционирование ЦФ в условиях отклонения частоты от номинальной. Реализация подобных алгоритмов усложняется тем, что необходимо дополнительно контролировать частоту сигнала для коррекции количества выборок. Уменьшить амплитуду колебательного процесса на выходе ЦФ также позволяет использование усредняющих ЦФ, что, однако, вносит дополнительную задержку в установление выходного сигнала.

Предлагаемый алгоритм компенсации колебаний на выходе ЦФ при отклонении частоты входного сигнала от номинальной в значительной степени свободен от указанных недостатков. Для его реализации, применительно к защитам, в которых контролируется один параметр (например, токовые защиты) необходимо выполнить следующую последовательность действий:

1. С использованием ДПФ выделяются синусная u_{sn0} и косинусная u_{cn0} ортогональные составляющие:

$$u_{cn0} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_n \cos \frac{2\pi n}{N}, \quad u_{sn0} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_n \sin \frac{2\pi n}{N} \quad (1)$$

где u_n – входной сигнал; N – число выборок на период основной частоты.

Амплитуда сигнала основной гармоники для произвольной выборки n определяется как:

$$U_{mn0} = \sqrt{u_{sn0}^2 + u_{cn0}^2}.$$

2. Определяются амплитуды синусного U_{msn0} и косинусного U_{mcn0} сигналов по текущим u_{sn0} , u_{cn0} и предыдущим $u_{s(n-1)0}$, $u_{c(n-1)0}$ выборкам, зафиксированным через период дискретизации T

$$U_{msn0} = \frac{\sqrt{u_{sn0}^2 - 2u_{sn0}u_{s(n-1)0} \cos \frac{2\pi}{N} + u_{s(n-1)0}^2}}{\sin \frac{2\pi}{N}} \quad (2)$$

$$U_{mcn0} = \frac{\sqrt{u_{cn0}^2 - 2u_{cn0}u_{c(n-1)0} \cos \frac{2\pi}{N} + u_{c(n-1)0}^2}}{\sin \frac{2\pi}{N}}$$

где $T = \frac{1}{f_0 N}$ – период дискретизации; $f_0 = 50$ Гц.

Достоинство выражений (2) является минимальная задержка в один период дискретизации T при определении амплитуды сигнала, что особенно важно для построения быстродействующих измерительных органов микропроцессорных защит [1].

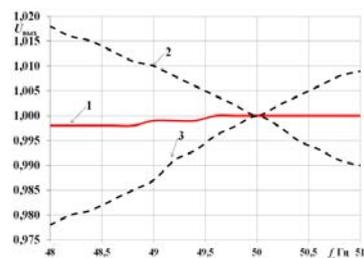
Далее вычисляется среднее значение амплитуд сигналов:

$$U_{mn0} = \frac{U_{msn0} + U_{mcn0}}{2} \quad (3)$$

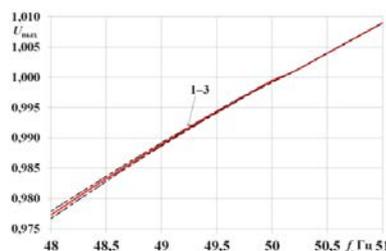
Оценка эффективности предлагаемого алгоритма компенсации колебаний амплитуды выходного сигнала при гармоническом входном воздействии проводилась с использованием модели ЦФ, реализованной в среде динамического моделирования MatLab-Simulink.

На рисунке 1 приведены зависимости размаха отклонений амплитуды выходного сигнала, ограниченные пунктирными линиями 2, 3, от среднего значения (кривая 1), при уходе частоты от номинальной для ЦФ ДПФ (рисунок 1, а) и ЦФ ДПФ с компенсацией (рисунок 1, б).

Как видно из представленных зависимостей, у ЦФ ДПФ наблюдаются колебания амплитуды выходного сигнала, размах которых пропорционален отклонению частоты от номинальной. Для ЦФ ДПФ с компенсацией характерно практически полное отсутствие колебаний амплитуды выходного сигнала при изменении частоты в диапазоне 48–51 Гц.



а



б

Рис. 1. Размах отклонений амплитуды выходного сигнала ЦФ ДПФ (а) и ЦФ ДПФ с компенсацией (б) при уходе частоты входного сигнала от номинальной

Предложен цифровой фильтр, основанный на дискретном преобразовании Фурье, формирующий ортогональные составляющие входных сигналов релейной защиты, дополненный алгоритмом компенсации колебаний их амплитуд при отклонении частоты сигнала от номинальной.

Литература

1. Romaniuk, F. Increase of operation speed of digital measuring elements of microprocessor protection of electrical installations / F. Romaniuk, V. Rumiantsev, A. Dziaruhina, V. Kachenya, K. Kierczynski // Przegląd Electrotechniczny (Electrical Review). – 2020. – Vol. 96, N 3. – С. 150–153.

ПЛАНИРОВАНИЕ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ СО СРОКОМ 5 ЛЕТ

Булат В.А.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

В настоящей работе проводится сопоставление и анализ учебных планов первой ступени образования заочной формы обучения для некоторых специальностей энергетического факультета БНТУ с пяти- и шестилетним сроком обучения.

Текст доклада:

С целью оптимизации национальной классификации образования путем гармонизации с международными классификациями, приведения в соответствие с видами экономической деятельности, укрупнения специальностей и устранения их дублирования Министерством образования Республики Беларусь было принято решение о сокращении сроков обучения по некоторым специальностям очной и заочной форм получения высшего образования 1 ступени (для очной формы 4 года, а для заочной 5 лет). В число таких специальностей на энергетическом факультете БНТУ вошли следующие специальности: 1-43 01 03 «Электроснабжение» (по отраслям); 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика»; 1-27 01 01 «Экономика и организация производства». Это потребовало существенной переработки учебных планов 1 ступени высшего образования, как для очной, так и заочной форм обучения. Отличительной особенностью новых учебных планов явилось их модульность.

Так учебный план специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» (по отраслям) набора 2018 года для заочной формы обучения в своей основе имеет модули государственного компонента, такие как социально-гуманитарный модуль-1, модуль естественнонаучных дисциплин, модуль специальных электротехнических дисциплин, модуль электрических машин и т. п. Широкое представительство модулей имеет компонент учреждения образования, который включает такие модули, как социально-гуманитарный модуль-2, модуль метрология, электроника и информационно-измерительная техника, модуль качество электроэнергии, изоляция и перенапряжение, модуль переходные процессы, модуль программное обеспечение и математические задачи энергетики, модуль экономика и организация предприятия и др. Кроме этого, учебный план содержит ряд дисциплин специализации, содержащих два модуля. Это модули электроснабжение промышленных предприятий и монтаж и наладка электрооборудования.

Анализ учебного плана, указанной выше специальности набора 2014 года и последующих лет и вновь разработанного плана 2018 года показал существенное сокращение сроков изучения обучающимися иностранного языка с 4-х до 2-х семестров, а также сокращение общетехнических дисциплин – физики, механики, экономика и организации производства; общепрофессиональных дисциплин – «Передача и распределение электроэнергии», «Релейная защита и автоматика систем электроснабжения» с двух до одного семестра.

Учебный план специальности 1-27 01 01 «Экономика и организация производств» набора 2018 года также разбит на модули. Модуль государственного компонента включает в себя модули социально-гуманитарных дисциплин-1, естественных и общетехнических дисциплин, организации производства, экономических дисциплин, дисциплин управления, модуль дисциплин безопасности жизнедеятельности, а также модуль дисциплин бухгалтерского учета, анализа и аудита. Компонент учреждения высшего образования содержит модуль социально-гуманитарных дисциплин-2, модуль дисциплин информационных технологий, модуль

основ механики и электроники, модули теплоэнергетических и электроэнергетических дисциплин, модуль дисциплин энергоэффективности и ресурсосбережения и др.

Анализ планов специальности показал, что в учебном плане с пятилетним сроком обучения значительно уменьшено количество часов на изучение таких дисциплин как математика, иностранный язык. При этом больше внимания уделено изучению дисциплины «Электроснабжение», а также включены новые дисциплины «Управление электрохозяйством предприятия», «Контроллинг и управление затратами в энергетике», «Бизнес-планирование в энергетике».

В целом уровень подготовки по выше указанным специальностям по новым учебным планам на наш взгляд будет несколько ниже из-за недостаточного освоения некоторых общеобразовательных и специальных дисциплин.

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 6–750 КВ

Шевалдин М. А.
ГПО «Белэнерго»

Аннотация:

Воздушные линии электропередачи (ВЛ) являются одними из ключевых звеньев в обеспечении качественного и бесперебойного снабжения потребителей электрической энергией. Вместе с тем они являются и наиболее повреждаемыми элементами электроэнергетической системы. Природные воздействия, такие как удар молнии или падение деревьев на провода, может привести к нарушению работы ВЛ. Поэтому одной из важных технических задач является определение места повреждения (ОМП) на указанных элементах сети для скорейшей локализации и организации работы по устранению нарушений в работе энергосистемы.

Текст доклада:

Основным видом повреждений ВЛ 110 кВ и выше являются однофазные короткие замыкания (КЗ), составляющие 65 % от общего числа повреждений на ВЛ. Двухфазные КЗ на землю (включая двойные замыкания на землю) происходят в 20 % случаев нарушения в работе ВЛ, двухфазные КЗ без земли – 10 %, трехфазные КЗ – 5 %. Результатом указанных повреждений могут быть длительные перебои в электроснабжении потребителей и существенные материальные убытки. Оперативный поиск мест повреждений на ВЛ невозможен без применения специализированных технических средств.

Соответственно, одним из ключевых факторов повышения надежности снабжения потребителей электрической энергией, обеспечения безопасности обслуживания и экономичности эксплуатации электроэнергетических сетей, является применение устройств и аппаратуры с функцией ОМП, которые позволяют оперативно выявлять аварийные участки ВЛ с целью последующего устранения причин отключения и, при необходимости, выполнения их ремонта.

В ГПО «Белэнерго» только 36,7 % ВЛ 6–110 кВ охвачены цифровыми средствами ОМП. Самый низкий процент по данному показателю в РУП «Брестэнерго» – 22,6 %, а самый высокий – в РУП «Гомельэнерго» – 51,9 %. В большинстве случаев на объектах ГПО «Белэнерго» применяются средства ОМП с использованием односторонних замеров, не требующих организации передачи информации постоянных измерений по каналам связи. В тоже время, при наличии указанных каналов, односторонний замер может осуществляться для резервного или предварительного ОМП. Применение микропроцессорных устройств ОМП позволяет выполнить переход от расчета расстояния до места КЗ по простым формулам на основе упрощенных математических моделей ЛЭП, к методам, использующим априорную информацию и анализирующим конфигурацию ВЛ, позволяющим учитывать сложные модели ВЛ и влияние на них различных факторов, которые искажают замеры, и, как следствие, снижают погрешность ОМП.

Уменьшить погрешность ОМП возможно, например, путем перехода на новые устройства, использующие двухсторонний замер и связанные между собой по каналам связи. Двухсторонний метод ОМП обладает более высокой точностью по сравнению с односторонним, но требует синхронизации и передачи данных по режиму ВЛ с обоих ее концов. Для синхронизации и сбора информации применяются новейшие средства телекоммуникации: спутниковые системы GPS, глобальная сеть, модемные каналы и др. Использование устройств синхронных векторных измерений для средств ОМП с двухсторонним замером также дает возможность значительно улучшить точность их работы, позволяет применять более сложные интеллектуальные алгоритмы функционирования.

Средства ОМП с применением волнового метода анализируют электромагнитные волны, появляющиеся в результате КЗ, т. е. фактически выполняют замеры времени, а не токов и напряжения, как большинство традиционных средств ОМП. Следовательно, погрешность их измерений не подвержена влиянию выше рассмотренных факторов. Тем не менее, данные устройства также имеют свои недостатки: сложности с замерами при КЗ вблизи места установки указанных устройств; малые углы повреждений; качество синхронизации устройств; неверно замеренная скорость распространения волны в ВЛ; погрешность вычисления бегущей волны.

Совершенствование методов и алгоритмов ОМП расширяет возможность их использования в релейной защите, в частности, для совершенствования дистанционной защиты, в том числе для повышения ее чувствительности для реализации принципа компенсации влияния переходного сопротивления, лежащего в основе метода ОМП.

Совершенствование существующих и разработка новых методов и технических средств ОМП в распределительных сетях 6–10 кВ также является актуальной задачей, так как эти ВЛ имеют сложную разветвленную структуру и наиболее часто подвержены возникновению повреждений.

Новые методы определения зоны КЗ на основе одностороннего дистанционного метода по параметрам поврежденной петли предложены в [1]. Данный метод обеспечивает расширение зоны мгновенного отключения до 95 % длины ВЛ и повышает эффективность первой ступени используемой защиты при КЗ через переходное сопротивление. В тоже время указанный метод требует наличия цепей напряжения, что значительно усложняет организацию релейной защиты и требует наличия контроля исправности данных цепей для исключения неправильных действий при их повреждении. Следовательно, целесообразно определять зону КЗ и вычислять расстояние до места повреждения только по уровню аварийных токов. Данный подход предложен в [2, 3]. С использованием указанного метода зона повреждения на ВЛ напряжением 6–10 кВ с односторонним питанием при междуфазных КЗ может быть установлена с приемлемой достоверностью путем контроля только разностей токов поврежденных фаз.

Исходя из вышеизложенного, необходимо продолжать работу по совершенствованию методов и алгоритмов ОМП. Дальнейшее развитие средств ОМП и повсеместное их внедрение на энергообъектах ГПО «Белэнерго» позволит повысить надежность электроснабжения потребителей и улучшить экономичность функционирования Белорусской энергосистемы, в том числе за счет уменьшения времени поиска мест повреждений.

Литература

1. Романюк, Ф.А. Определение места короткого замыкания на линиях радиальных сетей с односторонним питанием / Ф.А. Романюк, А.А. Тишечкин, Е.В. Булойчик // Наука и техника : международный научно-технический журнал. – 2012. – № 4. – С. 69–73.
2. Романюк, Ф.А. Определение места повреждения на линиях напряжением 6–35 кВ с односторонним питанием / Ф.А. Романюк, М.А. Шевалдин // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2014. – № 5. – С. 5–14.
3. Романюк, Ф.А. Определение зоны короткого замыкания на ЛЭП 6–35 кВ с односторонним питанием по току обратной последовательности / Ф.А. Романюк, Е.В. Булойчик, М.А. Шевалдин // Энергетическая стратегия : научно-практический журнал. – 2019. – № 2 (68). – С. 48–51.

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВА ЗАЩИТ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 6–10 КВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Шевалдин М. А.
ГПО «Белэнерго»

Аннотация:

Устройства релейной защиты линий электропередачи напряжением 6–10 кВ распределительных сетей являются самыми массовыми номенклатурными единицами электроэнергетической сети из-за того, что данные элементы являются одними из основных звеньев электроэнергетической системы. Поэтому обеспечение нормального эффективного функционирования и повышение технического совершенства указанных элементов релейной защиты является одной из важнейших технических задач.

Текст доклада:

Линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 6–10 кВ распределительных сетей являются основными элементами электроэнергетической сети многих стран. В Республике Беларусь общая протяженность ЛЭП всех уровней напряжения (0,4–750 кВ) по данным ГПО «Белэнерго» на 01.01.2019 составляет 279 278 километров, из которых на воздушные и кабельные ЛЭП напряжением 6–10 кВ приходится 103 289 км, то есть около 37 % от всех линий электропередачи в стране приходится непосредственно на ЛЭП распределительных сетей 6–10 кВ.

Внимание к организации релейной защиты (РЗ) указанных элементов сети должно быть самое ответственное, так как они являются связующими элементами различных узлов энергосистемы, и в первую очередь объектов электроэнергетики с конечными потребителями электрической энергии. Повреждения на рассматриваемых ЛЭП могут привести к выходу их из строя и необходимости их дальнейшего ремонта или замены, что связано с дополнительными финансовыми затратами. Ложные или излишние отключения ЛЭП в результате неправильной работы устройств релейной защиты приводят к финансовым потерям электроснабжающих организаций в результате недоотпуска электрической энергии, а также определенным штрафным санкциям к ним со стороны потребителей в рамках действующих договорных отношений. Необходимо учитывать и социальную значимость электроснабжения: без электроэнергии уже невозможно представить нормальный уклад жизни.

В Республике Беларусь для организации релейной защиты ЛЭП напряжением 6–10 кВ в основном используются устройства на электромеханической элементной базе (около 58 %), более трех четвертей из которых исчерпали свой нормативный срок службы, заложенный производителями рассматриваемых устройств. В тоже время отраслевыми техническими нормативно-правовыми актами ГПО «Белэнерго» предписывается применять устройства РЗА на микропроцессорной элементной базе. В настоящее время в стране проводится активная модернизация и реконструкция ЛЭП распределительных сетей напряжением 6–10 кВ с заменой элементов релейной защиты на микропроцессорные устройства.

Использование указанной элементной базы позволяет выполнять устройства РЗ с лучшими показателями технического совершенства, по сравнению с электромеханическими и микроэлектронными устройствами релейной защиты. Микропроцессорные устройства релейной защиты по сравнению с ними имеют лучшие характеристики по быстродействию, чувствительности и точности, меньшие ступени селективности, за счет чего снижается время воздействия токов повреждения, в том числе токов КЗ, на защищаемое электротехническое оборудование и сети. Цифровые устройства РЗ оснащаются встроенными системами самодиагностики и функционального контроля, характеризуются высоким уровнем унификации составных элементов и узлов, сокращенным сроком их разработки и обслуживания, позво-

ляют более точно обрабатывать поступающую информацию и сигналы, реализовывать более сложные и совершенные алгоритмы выявления и реагирования на ненормальные и аварийные режимы, что в конечном счете повышает не только информативность систем РЗ элементов электроэнергетической сети, но и в целом надежность работы энергосистемы.

В качестве устройств релейной защиты ЛЭП напряжением 6–10 кВ традиционно используются ступенчатые токовые защиты. Однако для указанных защит в некоторых режимах работы энергосистемы можно отметить наличие относительно больших выдержек времени для резервных ступеней токовых защит в следствие их выбора по ступенчатому принципу, особенно для организации резервирования защит участков сети, расположенных вблизи источников питания, выдержки срабатывания для которых могут достигать нескольких секунд. Также традиционные защиты характеризуются многоступенчатостью, недостаточной чувствительностью, особенно последних ступеней при выполнении дальнего резервирования, ограниченностью и непостоянством зоны работы быстродействующих ступеней, зависимостью алгоритмов их функционирования от вида повреждения, от величины активного переходного сопротивления в месте КЗ и от других факторов.

Для устранения указанных и других недостатков можно использовать более совершенные защиты, такие как продольные дифференциально-токовые или дистанционные. Но данные защиты сложнее традиционных токовых защит, а также требуют наличия дорогостоящих каналов связи для дифференциальных или измерительных трансформаторов напряжения на защищаемых присоединениях для дистанционных защит.

В тоже время, устранить или снизить влияние указанных недостатков можно за счет повышения технического совершенства токовых защит ЛЭП напряжением 6–10 кВ, в том числе за счет использования линейно зависимых характеристик выдержек времени их срабатывания, учета информации по определению вида повреждения, учета сведений по установлению зоны КЗ на линии электропередачи, а также за счет применения токовой защиты обратной последовательности для повышения чувствительности к несимметричным междуфазным повреждениям на указанных ЛЭП.

В Республике Беларусь активно создаются, совершенствуются и дорабатываются устройства релейной защиты ЛЭП напряжением 6–10 кВ распределительных сетей, ориентированные не только на собственные потребности страны, но также на продвижения белорусской продукции за ее пределами, в том числе на территории стран СНГ.

Литература

1. Романюк, Ф.А. Направление совершенствования токовых защит линий распределительных сетей / Ф.А. Романюк, М.А. Шевалдин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2015. – № 2. – С. 5–10.
2. Романюк, Ф.А. Новые алгоритмы работы токовых защит линий электропередачи распределительных сетей / Ф.А. Романюк, М.А. Шевалдин // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14-й Международной научно-технической конференции. (В 4 томах). Т. 1. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 10.
3. Шевалдин, М.А. Совершенствование систем РЗА на объектах Белорусской энергосистемы / М.А. Шевалдин // Энергетическая стратегия: научно-практический журнал. – 2018. – № 2 (62). – С. 10–13.