

Голованов Игорь Григорьевич,

к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: golovanov_ig@mail.ru

Кузнецов-Новгородцев Денис Анатольевич,

адъюнкт, Военная академия РВСН имени Петра Великого,

e-mail: denis2510@mail.ru

Алафьева Марина Александровна,

обучающийся, Ангарский государственный технический университет,

e-mail:alalafeve@mail.ru

Ключарев Кирилл Андреевич,

обучающийся, Ангарский государственный технический университет,

e-mail:kirillklyucharev90@gmail.ru

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЕНТИЛЬНЫХ РАЗРЯДНИКОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Golovanov I.G., Kuznetsov-Novgorodtsev D.A., Alafieva M.A., Klyucharev K.A.

FEATURES OF OPERATION OF VALVE DISCHARGERS IN THE POWER SUPPLY SYSTEM

Аннотация. Большинство предприятий заинтересованы в продлении эксплуатации вентильных разрядников, срок службы которых 20 лет и более, как высоконадёжных элементов системы электроснабжения. Предлагаются варианты проверки вентильных разрядников.

Ключевые слова: молния, вентильный разрядник, система электроснабжения, электрический разряд, надёжность.

Abstract. Most enterprises are interested in extending the operation of valve dischargers whose service life is 20 years or more, as highly reliable elements of the power supply system. Options for checking valve dischargers are offered.

Keywords: ightning, valve discharger, power supply system, electric discharge, reliability

Передача электроэнергии от источника электроснабжения к потребителю связано с использованием электрических сетей и подстанций, которые занимают значительные площади на поверхности Земли. Разряд молнии, который попадает в электроэнергетические объекты, вызывает перенапряжения в сети и, как результат, перерывы электроснабжения потребителей.

Распределение гроз по земной поверхности очень неравномерно. Наиболее частые грозы наблюдаются в экваториальной части Земли: на острове Ява насчитывается 220 грозовых дней в году, в Центральной Африке – 150, на большей части России число грозовых дней не превышает 40, в южных районах от 40 до 60 дней, в северных районах не превышает 20 в год [1].

Молния формируется в грозовом облаке. Грозовые облака образуются в результате восходящих потоков тёплого влажного воздуха. При подъёме на высоту воздух охлаждается, содержащаяся в нём влага конденсируется, и за счёт выделения скрытой теплоты парообразования поддерживается разность температур и плотностей поднимающегося теплового воздуха и окружающего холодного воздуха. Возникает стремительный восходящий поток воздуха, под

действием которого происходит разбрызгивание образующихся водяных капель. Образующиеся при этом мельчайшие водяные капли оказываются заряженными отрицательно, а более крупные – положительно. Поток воздуха разносит отрицательно заряженную пыль на значительные расстояния, образуя основной массив грозового облака. Положительно заряженные крупные капли выпадают в виде дождя на землю или удерживаются во взвешенном состоянии, образуя в грозовом облаке местные скопления положительных зарядов.

Таким образом, грозовые облака образуются в результате механического разделения зарядов капель воды противоположных знаков и сосредоточения в различных частях облака значительных зарядов одного знака. Накопление зарядов в грозовом облаке происходит до тех пор, пока напряжённость электрического поля в облаке не достигает значения, достаточного для развития ионизационных процессов. Разряд начинается в лавинной форме, переходящий при дальнейшем повышении напряжённости электрического поля в стримерную форму, представляющую собой последовательный ряд большого числа электронных лавин, сдвинутых одна по отношению к другой в пространстве и во времени. Дальнейшее увеличение напряжённости электрического поля в заряженном центре облака вследствие продолжающегося накопления зарядов приводит к удлинению стримеров до тех пор, пока количество электронов в канале стримера не оказывается достаточным для разогревания части канала до такой высокой температуры, при которой начинается термическая ионизация газа (от 4000 до 6000 К). Разделение зарядов в высокоионизированной плазме приводит к образованию новых стримеров. Последовательное развитие стримеров с окончания разогреваемой части канала приводит к её удлинению и постепенному продвижению к области противоположного заряда в облаке или по направлению к земле, вызывая либо внутриоблачные разряды молнии (большинство), либо разряды молнии на землю (меньшая часть разрядов). Такое образование – плазменный канал со стримерами на конце – получило название «лидер» (от английского слова ведущий) [2]. Огромная разность потенциалов по концам стримера, достигающая заземлённого предмета, приводит к быстрому разогреву канала стримера, сопровождающемуся его быстрым расширением от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, что приводит к образованию мощной звуковой волны, воспринимаемой как раскаты грома. Разряды молнии в значительно возвышающиеся над поверхностью земли проводящие предметы (опоры линии электропередач, телевизионные башни и т.д.) происходят в результате искажения электрического поля лидера относительно земли этими предметами, точнее, наводимыми зарядом лидера молнии зарядами на этих объектах. И чем больше наводимый на возвышающемся предмете заряд, тем больше увеличивается напряжённость поля развивающегося лидера молнии в направлении этого объекта, что определяет большую вероятность его поражения молнией. Таким образом, избирательность поражения молнией наземных

объектов в значительной степени определяется искажением электрического поля развивающегося лидера возвышающимися над поверхностью земли предметами, в том числе и объёмными зарядами вокруг этих предметов, образующимися в результате их коронирования. При ударе молнии в провод линии электропередачи (ЛЭП) или грозозащитный трос линии возникающая электромагнитная волна распространяется вдоль проводов линии (либо вдоль тросов). На рисунке 1 представлено расположение проводов ЛЭП и грозозащитного троса.

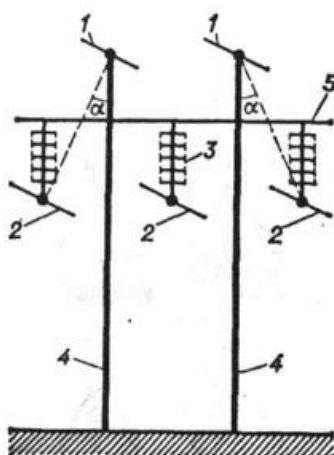


Рисунок 1 – Расположение проводов и грозозащитного троса линии электропередачи: 1 – грозозащитные тросы; 2 – провода линии фаз; 3 – изоляторы; 4 – опоры; 5 – горизонтальная траверса

При этом распространяющаяся вдоль линии волна грозового перенапряжения повторяет форму волны тока. Импульс перенапряжения имеет форму, представленную на рисунке 2 [1, 3].

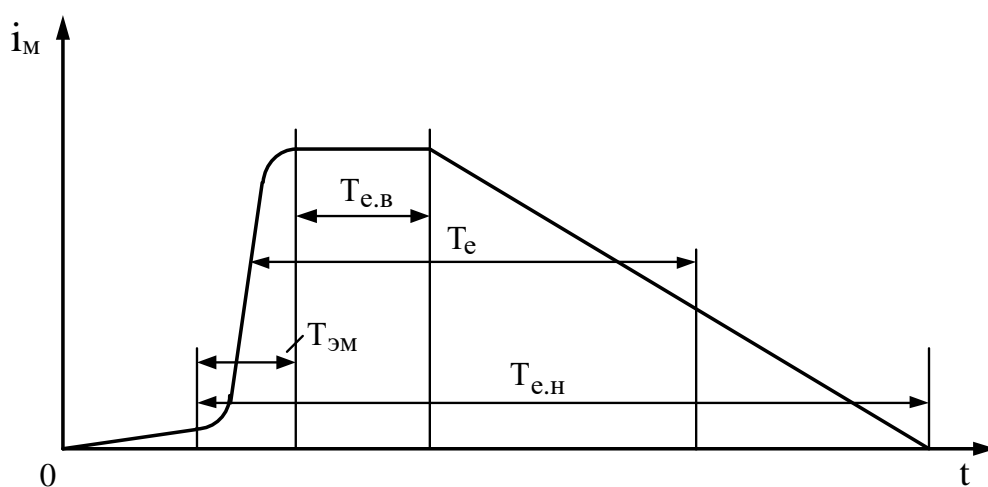


Рисунок 2 – Форма импульса перенапряжения от удара молнии

На рисунке 2:

- $T_{e.в}$ – время перемещения электронов в стримерах в верхней части искрового канала;
- $T_{э.м}$ – время нарастания тока в течение времени разогревания стримера, соединяющего канал лидера с заземляющим объектом
- $T_{e.н}$ – время нейтрализации объёмного заряда лидера;
- T_e – время перемещения электронов вдоль средней высоты канала лидера.

На рисунке 3 представлены принципиальная схема защиты трансформатора на подстанции с использованием вентильного разрядника (рисунок 3, а) и согласование вольт-секундных характеристик трансформатора и вентильного разрядника (рисунок 3, б).

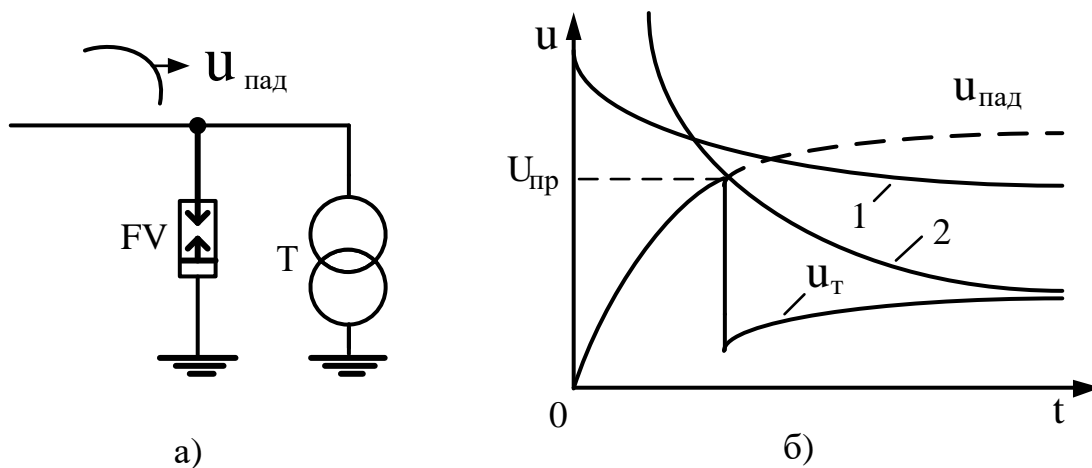


Рисунок 3 – Принципиальная схема защиты трансформатора на подстанции с использованием вентильного разрядника (а) и согласование вольт-секундных характеристик трансформатора и вентильного разрядника (б)

Вентильный разрядник подключают параллельно защищаемому объекту – трансформатору Т [4]. Чем больше величина напряжения, прикладываемого к искровой промежутку разрядника, тем быстрее он пробивается. Эта зависимость 2, показанная на рисунке 3,б, называется вольт-секундной характеристикой разрядника. В нормальных условиях искровой промежуток не пробивается и ток через FV не протекает. Когда же перенапряжение падающей волны $u_{пад}$ достигнет значения, определяемого вольт-секундной характеристикой 2 разрядника FV, то происходит его срабатывание, т.е. искровой промежуток (ИП) пробивается, соединяя линию, по которой идет перенапряжение, и защищаемую изоляцию с землёй и отводя электрические заряды опасной волны перенапряжения в землю через искровой разряд. Вольт-секундная характеристика 2 вентильного разрядника FV с учётом разброса его параметров должна лежать ниже вольт-секундной характеристики 1 защищаемой изоляции (рисунок 3, б). По опытным

данным этот интервал должен быть не менее 15÷20%. При выполнении этого требования появление опасных для изоляции трансформаторов перенапряжений невозможно, так как при набегании импульса перенапряжения и пад пробой вентильного разрядника происходит при напряжении $U_{пр}$ раньше, чем произойдет пробой изоляции защищаемого объекта.

При воздействии на разрядник импульса грозового перенапряжения пробивается искровой промежуток и через разрядник проходит импульсный ток, создающий падение напряжения на сопротивлении разрядника. Благодаря нелинейной вольт-амперной характеристике материала, из которого выполнено сопротивление, это напряжение мало меняется при изменении импульсного тока и незначительно отличается от импульсного пробивного напряжения искрового промежутка разрядника $U_{пр}$. Одной из основных характеристик разрядника является остающееся напряжение разрядника $U_{ост}$, т.е. напряжение на определенном токе от 5 до 14 кА для разных $U_{ном}$, который называется координирующим током. Импульсное пробивное напряжение искрового промежутка разрядника и близкое к нему напряжение $U_{опт}$ должны быть на 25% ниже разрядного напряжения изоляции (координационный интервал).

Вслед за импульсным током через разрядник вентильный (РВ) проходит сопровождающий ток промышленной частоты. Сопротивление нелинейного резистора при рабочем напряжении резко возрастает, сопровождающий ток существенно ограничивается, и при переходе его через нулевое значение дуга в искровом промежутке гаснет.

Наибольшее напряжение промышленной частоты на РВ, при котором надежно обрывается сопровождающий ток, называется напряжением гашения $U_{гаш}$, а соответствующий сопровождающий ток – током гашения $I_{гаш}$.

В последние годы в энергосистемах страны вентильные разрядники активно заменяются на более совершенные нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН). Однако до настоящего времени в энергосистемах число эксплуатируемых вентильных разрядников значительно превышает количество ОПН. Количество установленных ОПН по отношению к вентильным разрядникам составляет менее одного процента [5]. Заметим, что предприятия, эксплуатирующие вентильные разрядники, заинтересованы в продлении их срока службы, так как они зарекомендовали себя высоконадёжными устройствами. Следует отметить, что часть вентильных разрядников эксплуатируется от 10 до 20 лет, а некоторые – близко к предельному сроку службы, очевидно, что обновление или замена вентильных разрядников будет происходить в течение длительного времени, определяемого экономическими возможностями, интенсивностью повреждений и результатами отбраковки.

Следовательно, своевременное выявление неисправностей средств защиты от перенапряжений (СЗОП), качество работы которых гарантирует надёжность работы дорогостоящего электрооборудования, является актуальной проблемой электроэнергетики.

К методам диагностики, позволяющим своевременно выявить неисправности в СЗОП, относятся [5]:

- тепловизионное обследование (с помощью приборов инфракрасной техники с высокой разрешающей способностью по температуре не ниже 0,5 °С);
- измерение сопротивления изоляции ($R_{\text{изол.}}$);
- измерение пробивного напряжения ($U_{\text{пр}}$) промышленной частоты 50 Гц;
- измерение токов проводимости ($I_{\text{пр}}$) у разрядников с шунтирующими сопротивлениями, которые должны соответствовать нормативным значениям.

Методика тепловизионного контроля высоковольтных разрядников в рабочем состоянии достаточно хорошо разработана [6, 7, 8]. Благодаря её применению выявляются следующие виды неисправностей в элементах вентильных разрядников, приводящие к их перегреву [9]:

- нарушение герметичности;
- обрыв или увлажнение шунтирующих резисторов;
- замыкание искровых промежутков;
- нарушение заводской комплектации элементов.

При проверке вентильных разрядников на нагрев руководящий документ [10] предлагает считать исправным разрядник, «верхние элементы которого в месте расположения шунтирующих резисторов нагреты одинаково». Однако опыт эксплуатации показывает, что температуры одинаковыми на всех верхних элементах фаз разрядника одного присоединения практически никогда не бывают (несимметрия фазных напряжений, неидентичное расположение разных фаз разрядников относительно точки съёма, разная степень загрязнённости элементов разрядника и др.) и всегда отличаются (даже при исправных элементах) на доли, а иногда и на целые градусы. Практический опыт показывает, что при разнице перепада температуры верхних элементов разрядника относительно соседних от 2 до 3 °С можно с уверенностью утверждать, что элемент разрядника неисправен, и его необходимо вывести в ремонт. Если различие в температуре аналогичных элементов разных фаз разрядника в пределах от 2 до 5 °С, то целесообразно провести дополнительные испытания. После анализа всех результатов диагностики окончательное решение о ремонте остаётся за эксплуатирующим персоналом. Аналогичных выводов придерживаются и за рубежом [11].

Важным параметром и надёжным показателем, характеризующим работоспособность разрядников, является величина его пробивного напряжения. Это измерение на практике часто применяется в тех случаях, когда исправность того или иного элемента разрядника вызывает определённые сомнения по полученным термограммам тепловизионного контроля и данных измерений токов проводимости. Измерение пробивного напряжения вентильных разрядников производится с целью определения состояния их искровых промежутков и соответствия защитных характеристик требуемым нормам [12].

Испытания на пробой позволяют эффективно выявить неисправности разрядников, появившихся в результате неправильной транспортировки, разгерметизации в процессе эксплуатации или в результате снижения ими пропускной способности. Заметим, что пробивным напряжением элементов вентильных разрядников принято считать среднее значение из не менее трёх измерений для разрядников РВС, пяти измерений для разрядников РВРД, десяти измерений для разрядников РВМ, РВМГ и РВМК.

Оценка состояния вентильных разрядников производится путём сопоставления измеренных значений пробивного напряжения с предельно допустимыми значениями, приведёнными в паспорте разрядника или в действующих нормах испытания электрооборудования [13]. После окончания измерений пробивных напряжений дополнительно должны быть измерены токи проводимости разрядников при выпрямленном напряжении для контроля целостности шунтирующих сопротивлений. При проверке вентильных разрядников на пробивное напряжение по методике [13] определяется время подъёма напряжения частотой 50 Гц до пробивного. На элементе разрядников серии РВС, РВМ, РВРД, РВМГ, РВМК-330, РВМК-50 время не должно превышать 0,5 с, а для разрядников серии РВМК-499В, РВМК-750, РВМК-1150 не должно превышать 1,0 с.

Превышение допустимого времени подъёма напряжения может привести к перегреву и разрушению шунтирующих резисторов разрядника. С другой стороны, время подъёма напряжения должно быть не менее 0,1 с. Эти требования могут быть выполнены в испытательной установке для измерения пробивного напряжения вентильных разрядников с шунтирующими резисторами, принципиальная схема которой представлена на рисунке 4. Как известно, серийный выпуск подобных установок для испытания вентильных разрядников не производится, однако она может быть укомплектована и изготовлена в виде стенда, с использованием следующих рекомендаций [13].

На рисунке 6 [5] представлена принципиальная схема испытательной установки для измерения пробивного напряжения вентильных разрядников с шунтирующими сопротивлениями.

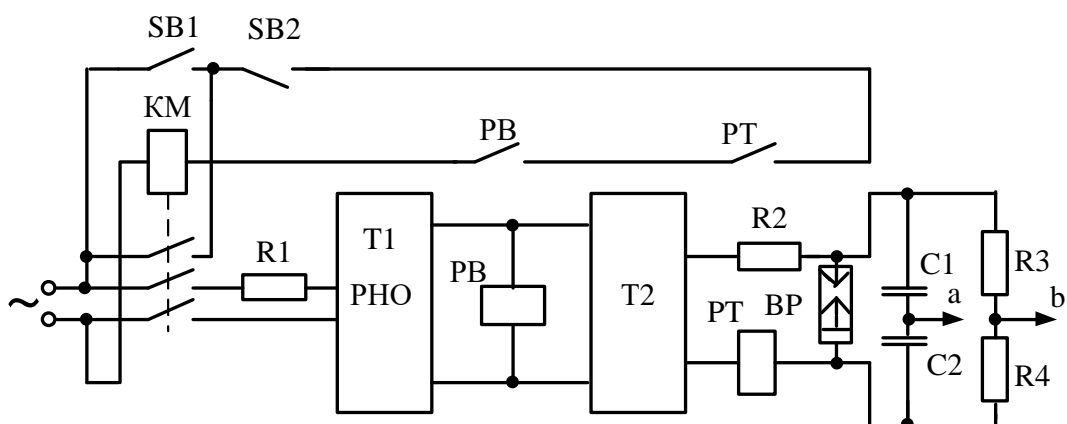


Рисунок 6 – Принципиальная схема испытательной установки для измерения пробивного напряжения вентильных разрядников с шунтирующими сопротивлениями: SV1, SV2 – соответственно кнопки включения и отключения; KM – реле; PB – реле времени; PT – реле тока; T1 – регулировочный трансформатор; R1, R4 – резисторы; C1, C2 – конденсаторы; BP – вентильный разрядник; а, б – возможные точки подключения цифрового регистратора

В качестве источника испытательного напряжения при определении пробивного напряжения разрядников РВС целесообразно использовать типовой трансформатор НОМ-100/10. Повышение напряжения на испытательном трансформаторе Т2 до значения пробивного в течение допустимого времени осуществляется регулировочным автотрансформатором Т1 типа РНО-250-10. В цепь питания РНО включается балластный резистор R1 со значением сопротивления от 0,5 до 1,0 Ом для ограничения тока в рабочих резисторах разрядника после пробоя искровых промежутков. Защитный резистор может быть включён со стороны испытуемого разрядника R2, при этом его сопротивление должно быть не менее 150 кОм. Сетевое напряжение 220 В через SV1 подаётся на магнитный пускатель KM, контакты которого обеспечивают подачу напряжения на регулировочный трансформатор Т1(РНО). На трансформаторе Т2 обеспечивается подъём напряжения до пробивного значения вентильного разрядника. Отключение РВС производится через реле тока РТ (РТ-40). Конденсаторы С1 и С2 и резисторы R3, R4 предназначены для измерения цифровым анализатором. Это схема достаточно проста и надёжна. Её недостаток: нет возможности накапливать результаты исследования. С этой целью применяют специальные автоматические цифровые анализаторы.

Существуют новые универсальные цифровые осциллографы и регистраторы, которые предназначены, как правило, для лабораторных исследований и малоприспособны для применения в составе высоковольтных установок с мощными электромагнитными импульсами и помехами. В то же время современная микроэлектроника [14] позволяет создать специализированные и сравнительно дешёвые цифровые устройства для этих целей. Разработанные в [15,16] цифровые регистраторы с успехом можно применять для определения пробивного

напряжения вентильных разрядников от 35 до 500 кВ. Структурная схема цифрового регистратора представлена на рисунке 7 [5]. Схема испытания (рисунок 7) содержит формирователь испытательного напряжения ФИН, испытуемое СЗОП, делитель напряжения ДН, состоящий из последовательно соединённых высокоомного сопротивления R_1 , измерительного сопротивления R_2 , дополнительного сопротивления R_3 , систему подавления помех СПП и цифровой регистратор.

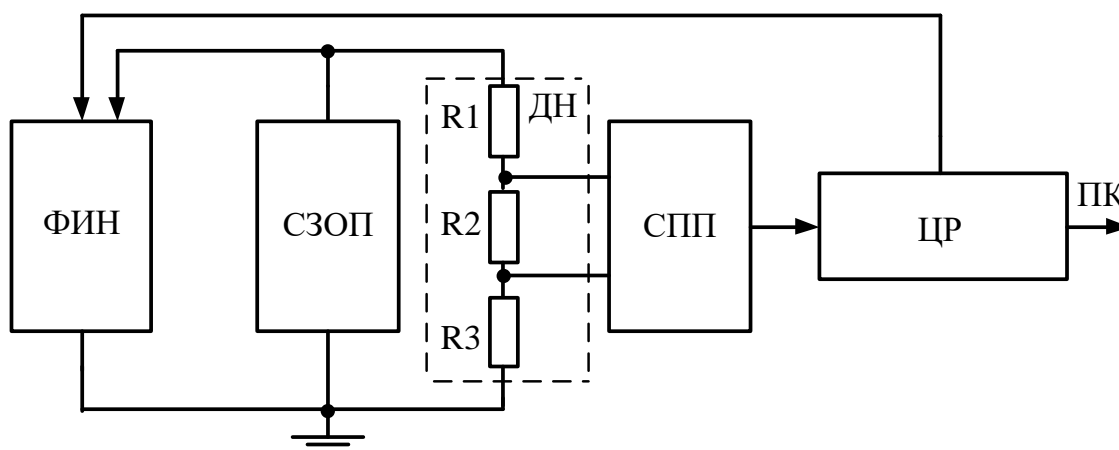


Рисунок 7 – Структурная схема цифрового регистратора для определения пробивного напряжения вентильных разрядников

Данная разработка позволяет не только в лабораторных условиях проверять вентильные разрядники, но и на подстанции автоматически проводить несколько проверок подряд и сохранять результаты исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Г.Н. Молния и молниезащита / Г.Н. Александров; [отв. ред. В.Н. Козлов]; Ин-т электрофизики и электроэнергетики РАН. – М.: Наука, 2008. – 274 с.
2. Ретер Г. Электронные лавины и пробой в газах / Пер. с англ.; Под ред. В.С. Комелькова. – М.: 1968 (англ. изд. 1964 г., Лондон).
3. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – 2-е изд., стереотипное, перепечатка с издания 1989 г. – М.: ООО «Издательский дом Альянс», 2009. – 592 с.
4. Васильев А.А., Крючков И.П., Наяшкова Е.Ф., Околович М.Н. Электрическая часть станций и подстанций. / Под ред. А.А. Васильева (2-е издание). М.: Энергоатомиздат, 1990. – 426 с.
5. Михеев Г.М. Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования. – М.: Издательский дом «Додека-XXI», 2008. – 304 с.

6. Власов А.Б. Результаты многолетнего использования тепловизора для контроля состояния электрооборудования в Колэнерго / А.Б. Власов // Электрические станции. – 1996. – № 8. – С. 61 – 63.
7. Баталыгин С.Н. Комплексное обследование силовых трансформаторов / С.Н. Баталыгин, Г.М. Михеев, В.М. Шевцов // XXVI сессия семинара «Кибернетика электрических систем по тематике «Диагностика электрооборудования». – Новочеркасск. – 2004. – С. 14–16.
8. Михеев Г.М. Тепловизионный контроль высоковольтного электрооборудования: Учеб.пособие /Михеев Г.М. – Чебоксары: Изд-во Чуваш.ун-та. – 2004. – 180 с.
9. Лапонов С.Н. Тепловизионный контроль и диагностика электрооборудования / С.Н. Лапонов, В.В. Шишминцев // Промышленная энергетика. – 2000. – № 11. – С. 15 – 17.
10. Объём и нормы испытаний электрооборудования / Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. РД 34.45-51.300-97. 6-е изд., с изм. и доп. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС. – 2002. – 256 с.
11. Standart Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography. E1934-99 a.
12. ГОСТ 16357-83. Разрядники вентильные переменного напряжения от 3,8 до 600 кВ. – М.: ИПК Изд-во стандартов. – 1999. – 31 с.
13. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования. Раздел 7. Методы контроля вентильных разрядников, ограничителей перенапряжений, трубчатых разрядников. – М.: СПО ОРГРЭС. – 1997. – 26 с.
14. Mixed-Signal and DSP Design Techniques. Edited by ADI's Walt Kester, Newnes. 2003. – 336 p.
15. Михеев Г.М. Устройство цифрового осциллографирования для диагностики состояния быстродействующего РПН силового трансформатора /Г.М. Михеев, Ю.А. Фёдоров //Промышленная энергетика. – 2005. – № 8. – С.5–7.
16. Михеев Г.М. Методы и технические устройства контроля вентильных разрядников /Г.М. Михеев, Ю.А. Фёдоров, В.М. Шевцов, С.Н. Баталыгин // Электрические станции. – 2005. – № 9. – С. 37–41.