

621.317.7

## **ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЯ НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОТКЛЮЧЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ**

Ломакин С.И., магистрант гр. ЭПмз-211, II курс  
Научный руководитель: Беляевский Р.В., к.т.н., доцент  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева  
г. Кемерово

При выведении в ремонт воздушных линий электропередачи (ВЛ), возникает проблема, связанная с тем, что даже отключенные, они испытывают влияние со стороны соседних высоковольтных ВЛ, находящихся под напряжением. Экспериментальные исследования показывают, что уровень наведенного напряжения на ВЛ целом в ряде случаев, например тяговых сетей электрифицированной железной дороги, может значительно превышать предельно допустимые значения, что создает ситуацию опасную для жизни и здоровья персонала, занимающихся ремонтом ВЛ, делает необходимым предварительное определение значения наведенных напряжений [1]. Это может быть сделано как прямым измерением (прямой метод), так и с помощью расчетов (расчетный метод).

При всех преимуществах второго подхода, он имеет серьезные ограничения в применении. Сейчас уже есть методики и программы для расчёта, наведенного напряжения. Примеры таких расчетов приведены в работах [2-4]. Однако их можно использовать для ограниченного числа случаев. Они дают хороший эффект в случае расчёта наведенного напряжения для единственного синусоидального источника возмущения частотой 50 Гц, или если набор гармонических составляющих (спектр тока) имеет небольшой диапазон. [4]. Такие условия крайне редко встречаются в реальных ситуациях. Как показывают экспериментальные исследования, в реальных условиях спектральный состав наведенного напряжения значительно шире. Кроме того, он сильно зависит от относительного содержания отдельных гармоник, конкретных характеристик источника внешнего воздействия и условий этого воздействия. Поэтому точно рассчитать наведенное напряжение от конкретного источника на практике очень сложно, если вообще возможно. Это приводит к тому, что расчетное значение наведенного напряжения может значительно отличаться от реального, что нежелательно. Поэтому ведется активная разработка точной и безопасной в работе измерительной аппаратуры позволяющей определить наведенное напряжение на отключенных воздушных линиях электропередач непосредственно на месте [5].

В современных осциллографах для непосредственного измерения высокого напряжения используется следующий способ. Напряжение подается на

делители напряжения в виде шунта, который позволяет разделить напряжение и передать на измерительный прибор сигнал, который пропорционален величине напряжения на воздушной линии. Сигнал по кабелю передается к измерительной схеме, а затем регистрируется с помощью осциллографа. Непосредственное измерение позволяет более точно оценить опасность наведенного напряжения. Однако он также имеет целый ряд ограничений и недостатков, связанный со схемотехникой, конструктивными и метрологическими особенностями делителей, что не позволяет точно измерить напряжение. Специалисты отмечают значительные проблемы в надежности и точности такого оборудования. Это относится как к первичному высоковольтному, так и ко вторичному измерительному оборудованию [4].

В наибольшей степени погрешности в работе оборудования связаны с недостатками преобразователей (делителей) высокого напряжения. Именно преобразователи отвечают за точность определения коэффициента преобразования по амплитуде, отсутствие фазовой ошибки, ограничивают диапазон полосы пропускания и обеспечивают стабильность работы измерительного оборудования во времени и в изменяющихся условиях [6].

Для проведения измерений наведенного напряжения чаще всего применяются резистивные делители. Это делители, построены исключительно на активных сопротивлениях. Их достоинством является то, что коэффициент деления не зависит от частоты приложенного напряжения. Однако они очень чувствительны к паразитным емкостям элементов делителя по отношению к заземленным частям. Это неизбежно приводит к искажению формы выходного сигнала по отношению к входному сопротивлению и как следствие ведет к значительной погрешности измерения [7].

Кроме того, использование чисто резистивных делителей для осциллографирования наведенных напряжений на отключенных воздушных линиях не даст желаемого результата из-за того, что делитель, работающий на высоком переменном напряжении, должен иметь большое сопротивление верхнего плеча. Это приводит к подавлению высших гармоник, которые особенно важно учитывать при измерениях на воздушных линиях. Наконец, серьезным ограничением для использования резистивных делителей являются их значительные габариты и вес. Их конструкции достаточно громоздкие, из-за чего их сложно использовать в мобильных установках.

Помимо резистивных делителей для измерения наведенного напряжения могут быть использованы емкостные делители [4]. Они обладают лучшими амплитудно-частотными характеристиками, меньше по габаритам и массе, однако их использование крайне ограничено особенностями, используемых в них высокоточных высоковольтных конденсаторов. Высоковольтные конденсаторы создаются на основе диэлектриков, для которых характерны значительные диэлектрические потери, существенная зависимость от электрической емкости приложенного напряжения. Наблюдается зависимость входного и выходного импеданса от частоты приложенного напряжения.

Недостатком емкостных делителей является также недостаточная электромагнитная экранировка, которая связана со сложностью обеспечения необходимой электрической прочности. Кроме того, емкостные делители имеют недостатки сходные с резистивными преобразователями, они чувствительны к паразитным емкостям элементов делителя, при их использовании необходимо учитывать влияние паразитных емкостей на экран. Наконец, определенные трудности имеются при воспроизведении коэффициентов деления, выраженных нецелыми числами, например, с множителями [8]. Все это оказывает значительное влияние на точность измерения.

Однако ёмкостные делители имеют важные преимущества перед резистивными, связанные с более широкой полосой пропускания, что позволяет избежать подавления высших гармоник, которые особенно важно учитывать при измерениях на высоковольтных воздушных линиях. Именно поэтому их следует взять за основу для решения проблем осциллографирования наведенных напряжений на отключенных воздушных линиях.

По мнению автора это возможно если использовать современные многослойные керамические чип-конденсаторы на высокие напряжения, вплоть до 3,15 кВ. Они появились недавно и позволяют разработать и изготовить малогабаритные емкостные делители напряжения. Данный вид конденсаторов имеет целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными емкостными делителями. К ним можно отнести: значительный диапазон емкостей, широкий выбор диэлектриков с различными свойствами, многообразие типоразмеров, минимальные габариты, а также низкую стоимость. Современные многослойные керамические чип-конденсаторы на высокие напряжения уже используются в электрических цепях постоянного, переменного токов и в импульсных режимах. Их достаточно легко монтировать поверх печатных плат в автоматическом режиме с последующей пайкой оплавлением, горячим воздухом или в инфракрасных печах [6]. Конструкция многослойных керамических чип-конденсаторов показана на рис. 1.

Чип-конденсаторов состоит из чередующихся слоев керамического диэлектрика и металлических пленочных электродов. По краям металлические электроды соединяются между собой с помощью торцевых никелевых выводов, которые покрываются оловом.

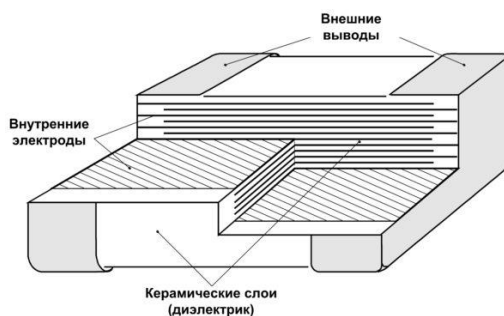


Рис. 1. Конструкция многослойного керамического smd конденсатора

Основным достоинством многослойной структуры является достижение высокой удельной емкости. Кроме того, с помощью изменения геометрических параметров слоев, можно значительно варьировать характеристики конденсаторов. Например, если необходимо получить большую емкость, то достаточно будет увеличить число слоев. Уменьшение толщины диэлектрика, также приводит к увеличению емкости, однако при этом происходит уменьшение рабочего напряжения. Таким образом, для достижения максимального рабочего напряжения используют максимальную толщину диэлектрика. Несмотря на важность геометрических размеров, решающее влияние на значения электрических характеристик многослойных конденсаторов оказывает тип используемого диэлектрика. Для маркировки конденсаторов используется трехсимвольный код в формате буква-цифра-буква (первый символ указывает самую низкую температуру, при которой может работать конденсатор; второй символ указывает максимальную температуру; третий символ указывает максимальное значение изменения емкости в температурном диапазоне компонента) [9].

Небольшие габариты емкостных делителей напряжения на основе керамических конденсаторов, способных измерять высокие напряжения, вплоть до 3,15 кВ, в сочетании со способностью измерять несинусоидальные значения наведенного напряжения, определять наибольшее возможное значения наведенного напряжения на проводах отключенной ВЛ и определять необходимую полосу пропускания делают одним из наиболее перспективным направлением разработки инструментов для осциллографирования наведенных напряжения на отключенных воздушных линиях.

Принципиальная схема такого делителя представлена на рис.2., где  $C_v$ ,  $C_{н1}$ ,  $C_{н2}$  – емкости верхнего и нижнего плеча соответственно,  $\Phi$ ;  $U_{исп}$ ,  $U_1$ ,  $U_2$  – испытательное напряжение и напряжения на участках делителя,  $V$ . Задавая значение емкости и количества конденсаторов определяем значения выходных напряжений для осциллографирования наведенного напряжения и исследования его гармонического состава с целью определения влияния высших гармоник на его значение.

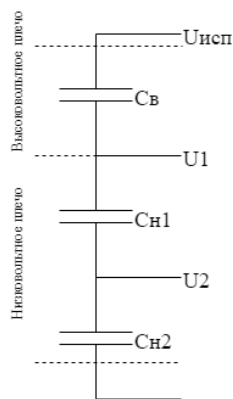


Рис. 2. Принципиальная схема делителя напряжения

### Список литературы:

1. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (приложение к приказу Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 15.12.2020 № 903н) [Электронный ресурс] – URL: <http://www.mos.gosnadzor.ru/about/documents/Приказ%20Минтруда%20от%2015.12.2020%20№%20903н-.pdf> (дата обращения: 14.03.2023).
2. Костенко, М.В. Методика расчета защиты линии связи от опасного влияния линии электропередачи / М.В. Костенко // Электричество, 1984. – № 4. – С.1-6.
3. Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб., Питер, 2003 – 463 с.
4. Дроздова, О.В. Исследование влияния системы тягового электроснабжения переменного тока на отключенные линии электропередачи / О.В. Дроздова, М.В. Якубович // Вестник МГТУ (Труды Мурманского государственного технического университета), 2010. –Т. 13. – № 4/2. – С. 918-922.
5. Селиванов, В.Н. Исследование гармонического состава наведенного напряжения на линиях электропередачи, выведенных в ремонт / В.Н. Селиванов, О.В. Залесова, В.В. Колобов, А.В. Богданова, В.Ф. Данченко // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика, 2016. – Вып. 12. – №1 (35). – С. 57-68;
6. Шваб, А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения / А. Шваб. – 2-е изд., перераб. и доп. Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.
7. Курбацкий, В. Г. Определение наведенных напряжений и токов на проводах ВЛ, находящихся в зоне влияния действующих высоковольтных линий электропередач В.Г. Курбацкий // Известия вузов. Энергетика, 1990. – №10. – С. 31-35.
8. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник / Л.А. Бессонов. – 10-е изд., стереотипное. – М.: Гардарики, 2003. – 317 с.
9. Кужекин, И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении / И.П. Кужекин. – М.: Энергия, 1980. – 136 с.