

Авторы:
к.т.н. Ильин В.Ф.,
Ильин Н.В.,
ООО НПП «ЭКРА»,
г. Чебоксары, Россия.

ЗАЗЕМЛЕНИЕ В ШКАФАХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ЗАЩИТ

THE GROUNDING IN THE MICROPROCESSOR PROTECTION CABINETS

Аннотация: рассмотрены вопросы организации системы заземления в шкафах микропроцессорных защит, предложена методика экспериментального определения эффективности заземления с использованием оборудования для ЭМС-тестирования.

Ключевые слова: заземление, импульсная характеристика, микропроцессорная защита, ЭМС-тестирование.

Abstract:

The paper deals with the organization of the grounding in the microprocessor protection cabinets and the technique of the experimental determination of the grounding, using equipment for EMC testing.

Keywords:

grounding, impulse response, microprocessor protection, EMS- testing.

Введение

Заземление в шкафах с электронным оборудованием, несомненно, является одним из самых сложных вопросов проектирования. Хотя базовая концепция заземления сравнительно проста, с практической ее реализацией дела обстоят сложнее. В этой области не существует единого подхода, который гарантировал бы только положительные результаты, но есть ряд моментов, которые необходимо учитывать при решении задач обеспечения ЭМС. В статье приведены теоретическое и экспериментальное положения по организации заземления в шкафах релейной защиты и автоматики (РЗА).

Система заземления в шкафах РЗА

Суть заземления состоит в гальваническом соединении электрических компонентов и элементов конструкции шкафа с заземляющим устройством, чтобы обеспечить путь с низким сопротивлением для протекающих по земле возвратных токов [1, 2]. В зависимости от целей, преследуемых системой заземления, могут быть использованы определенные типы электрических соединений и конструктивных исполнений, которые нельзя заменить другими.

Параметры цепи заземления в шкафах РЗА должны соответствовать нормам защитного заземления. Защитное заземление служит исключительно для обеспечения безопасности персонала в случаях повреждения оборудования. Оно призвано понизить напряжение прикосновения и термическую нагрузку, защита от поражения электрическим током, как правило, обеспечивается заземлением с автоматическим отключением от сети. Защитное заземление не требует высокой технологии и доступно проверке на всех этапах производства и эксплуатации. Критерием эффективности является величина омического сопротивления цепи заземления, которая управляется простым подбором сечения в соответствии с длиной за-

земляющего проводника. Контактные соединения выполняются обычно болтами, в последнее время практикуются саморезы. При наличии на контактной поверхности следов покраски применяются царапающие шайбы, призванные обеспечить гальваническое соединение.

В шкафах с микропроцессорным оборудованием может применяться более сложная технология зонального одноточечного заземления с использованием главной шины заземления (ГШЗ) с развитой поверхностью для выравнивания потенциала в условиях высокочастотных помех (рис. 1).

Указанные исполнения предполагают частичное использование принципов экранирования и зонирования, практикуемых при построении систем функционального заземления и заземления для обеспечения ЭМС [2].

Функциональное заземление выполняется для того, чтобы электронное оборудование нормально работало в составе другого оборудования. Оно предусматривает средства, создающие точку или плоскость опорного потенциала для сигнальных цепей, где доминирующую роль играет полное сопротивление цепи заземления (рис. 2).

Шкафы с терминальным оборудованием имеют дело с информационным массивом, поступающим по разнесенным кабелям в виде гальванически развязанных аналоговых, дискретных и цифровых сигналов. Обычно источники сигналов изолированы от земли и могут иметь произвольные (плавающие) потенциалы, вызывающие возвращаемые по заземляющим проводникам помеховые токи. Для импульсных и высокочастотных помех заметную роль играет индуктивность проводников, создающая негативные условия для взаимодействия сигналов, искажения их формы и нарушения временных соотношений. Эти факторы могут быть причинами нарушений нормальной

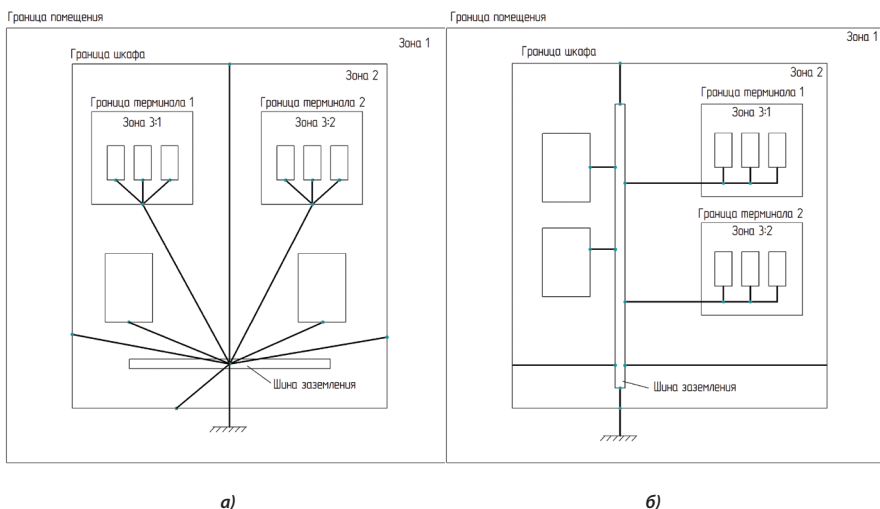


Рис. 1. Варианты исполнения зонального одноточечного заземления по системе «звезда» (а) и «шина» (б)

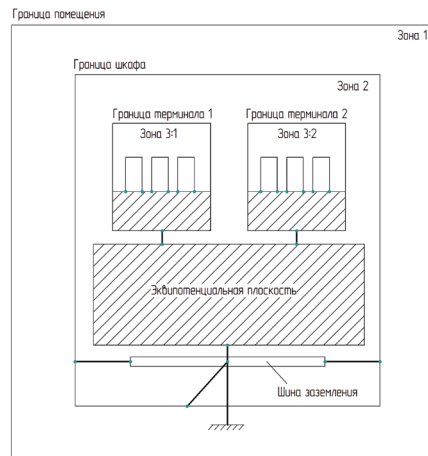


Рис. 2. Вариант исполнения зонального многоточечного заземления с эквипотенциальной плоскостью

работы терминального оборудования. Функциональное заземление выполняется по многоточечной схеме с использованием эквипотенциальных плоскостей и коротких заземляющих проводников с низкой индуктивностью. В шкафах, насыщенных терминальным оборудованием и имеющих дело с большими информационными потоками, система функционального заземления должна проектироваться наиболее тщательно.

Очевидно, что эффективность системы функционального заземления невозможно определить традиционными методами проверки. Необходимость и достаточность принятых решений для ее реализации должны обосновываться инженерными выкладками.

Авторами работы [2] сформулировано еще одно определение – система заземления для обеспечения ЭМС. В дополнение к предыдущей эта система определяет необходимость увязывать цепи заземления со средствами экранирования и зонирования, учитывать скрытые в конструкции распределенные емкости и индуктивности, которые могут ослаблять или усиливать помехи на резонансных частотах, контролировать контактные соединения, способные генерировать шумы.

Технологические приемы, исполь-

зуемые при проектировании заземления для обеспечения ЭМС, не столь однозначны и очевидны. На сегодня среди специалистов нет определенности по частотным параметрам заземления, технологическим разбросам и эксплуатационным изменениям. Отсюда субъективный подход в оценке необходимости и достаточности использованных средств. Объективным критерием эффективности заземления для обеспечения ЭМС могут быть результаты целевых испытаний.

Параметры цепи заземления

Негативное поведение цепи заземления в условиях воздействия импульсных и высокочастотных помех обусловлено в основном ее индуктивностью. Требования стандартов по ЭМС предусматривают проверку устойчивости шкафов РЗА на воздействие импульсных помех: микросекундных – с амплитудой до ±4 кВ при соотношении длительностей фронта и импульса 1/50 мкс (1,2/50 мкс) и наносекундных – ±4 кВ, 5/50 нс. Частота высшей гармоники в спектре импульса определяется соотношением:

$$f_{\text{макс}} = \frac{1}{4t_{\phi}}$$

где t_{ϕ} – длительность фронта импульса помехи.

Для микросекундных импульсов

частота высшей гармоники составляет 250 кГц, для наносекундных – 50 МГц.

Для определения индуктивности заземляющих цепей можно воспользоваться известными формулами для прямолинейных проводов [3, 4]:

- для проводника круглого сечения

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right);$$

- для плоского проводника из тонкой ленты

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{0,24w} - 1 \right),$$

где: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м – магнитная постоянная; μ_r – относительная магнитная проницаемость материала проводника; l – длина проводника, r – радиус поперечного сечения линейного проводника; w – ширина плоского проводника.

Согласно приведенным формулам, индуктивность длинных проводников практически не зависит от профиля сечения. О явном преимуществе плоского проводника можно говорить лишь при соотношении $l/w \leq 3 \dots 5$.

В инженерной практике часто пользуются приближенным значением удельной индуктивности прямолинейного провода: 1 мкГн/м, а для расчета индуктивности плоского проводника используют приближенный поправочный коэффициент: $0,4 \leq k \leq 1$.

Таким образом, заземляющий про-

водник сечением 2,5 мм² и длиной 1 м ведет себя на промышленной частоте как активное сопротивление $R \approx 0,02$ Ом, а на высокой частоте – как индуктивность $L \approx 1$ мкГн. В результате, на частоте 250 кГц (спектр микросекундной помехи) его полное сопротивление составляет около 1,5 Ома, что почти на два порядка выше величины активного сопротивления. На частоте 50 МГц (спектр наносекундной помехи) его полное сопротивление возрастает еще на два порядка и составляет 300 Ом.

Схема испытательной установки и расчетная модель

Эффективность того или иного участка заземления можно определить по его реакции на воздействия короткого импульса. На рис. 3 приведена схема испытательной установки, где генератор микросекундных импульсов подключается непосредственно к зажиму заземления микропроцессорного терминала.

Испытания проводятся при снятом напряжении оперативного питания. Поверхность земли моделируется металлическим листом, в центре которого устанавливается на изолирующей подставке испытуемый шкаф. Все испытательное оборудование заземляется на опорный металлический лист. С помощью цифро-

вого осциллографа контролируются одновременно переходные напряжения в точках К1 на зажиме заземления терминала и К2 на ГШЗ и переходной ток в возвратном проводе генератора. Измерения напряжений ведутся относительно опорного листа заземления. В качестве генератора импульсов используется имитатор микросекундных помех большой энергии, внутренняя схема которого соответствует приведенной в базовом стандарте по ЭМС [5].

В нагрузочном контуре генератора импульсов можно выделить характерные участки цепи заземления, которые размещены внутри и вне шкафа. Характеристика внешней цепи заземления определяется параметрами короткого проводника, соединяющего ГШЗ с опорным листом. В эксперименте был использован входящий в комплект поставки типового шкафа РЗА плоский проводник типа АМГ сечением 16 мм² и длиной $l=0,8$ м. Для заземления микропроцессорного терминала, размещаемого в отделении шкафа с целью удобства пользования интерфейсом человека машина на высоте 1...1,5 м, требуется при одноточечном исполнении длинный проводник: $l=2$ м. Руководствуясь удельным параметром линейного провода, можно предположить, что приблизительно в

такой же пропорции будут соотноситься индуктивности указанных участков заземления.

Заземление по многоточечной схеме предполагает использование эквивалентной плоскости, в качестве которой могут выступать цельнометаллические конструктивные элементы шкафа. На рис. 3 приведен второй вариант исполнения заземления терминала с использованием металлической монтажной плиты, входящей в состав шкафа. Плита гальванически соединена короткими проводниками с корпусом терминала и ГШЗ. В этом случае входящий в цепь заземления участок плиты может рассматриваться как плоский проводник, призванный ослабить индуктивную реакцию цепи.

На рис. 4 приведена эквивалентная электрическая схема обобщенной цепи заземления шкафа.

Текущее падение напряжения на участках эквивалентной схемы связано с током следующими соотношениями:

$$u_1(t) = (L_{3T} + L_{3Ш}) \frac{di(t)}{dt} + (R_{3T} + R_{3Ш})i(t);$$

$$u_2(t) = L_{3Ш} \frac{di(t)}{dt} + R_{3Ш}i(t);$$

$$u_{12}(t) = u_1(t) - u_2(t) = L_{3T} \frac{di(t)}{dt} + R_{3T}i(t),$$

Рис. 3. Схема испытательной установки для определения импульсной характеристики цепи заземления

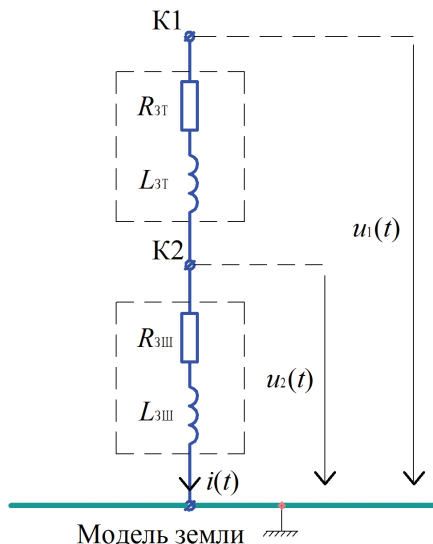
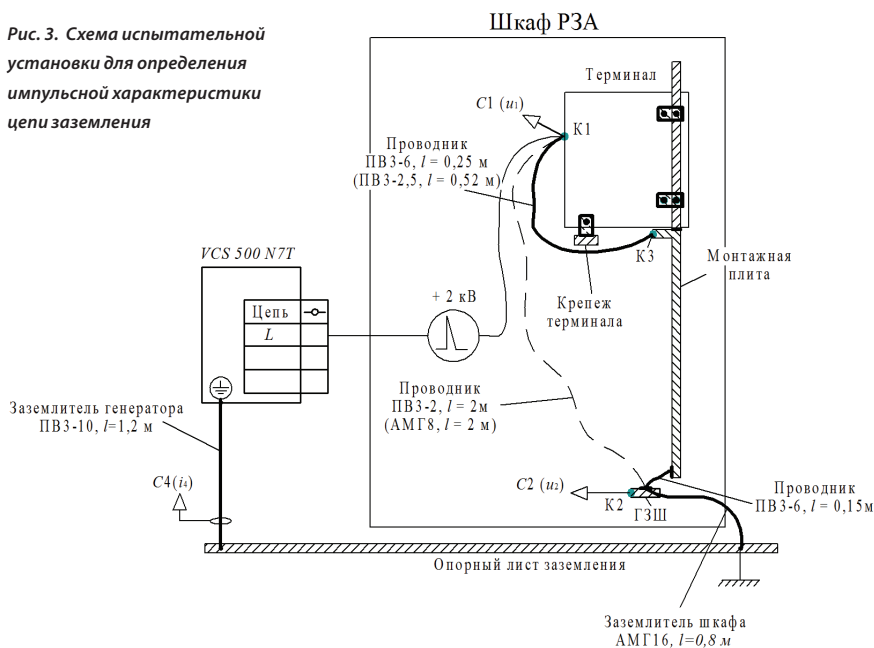


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема цепи заземления терминала ($R_{3ш}, L_{3ш}$) и шкафа ($R_{3т}, L_{3т}$)

где $u_1(t)$ – суммарное падение напряжения на последовательно включенных участках заземления терминала и шкафа; $u_2(t)$ – падение напряжения на участке заземления шкафа; $u_{12}(t)$ – падение напряжения на участке заземления терминала, $i(t)$ – ток в цепи заземления.

Приведенные на рис. 5 временные диаграммы характеризуют переходные процессы, вызванные в результате воздействия микросекундного импульса.

В начальный момент времени t_1 , когда крутизна нарастания тока соответствует максимальному значению, на участках цепи устанавливаются максимальные уровни напряжения: $u_1(t_1)=U_{M1}$ и $u_2(t_1)=U_{M2}$. В это время мгновенное значение тока еще мало и доминируют индуктивные составляющие напряжения. Следовательно, применительно к моменту t_1 можно пользоваться приближенными соотношениями:

$$U_{M1} \approx (L_{3T} + L_{3Ш}) \frac{di(t_1)}{dt};$$

$$U_{M2} \approx L_{3Ш} \frac{di(t_1)}{dt};$$

$$U_{M12} \approx L_{3T} \frac{di(t_1)}{dt}.$$

Экспериментальные результаты

Представленные на рис. 6 и 7 осциллограммы иллюстрируют реальные электромагнитные процессы, возникающие в схеме в результате подачи микросекундного импульса на корпус терминала в контрольную точку K1. Генератор микросекундных импульсов был настроен на режим работы по схеме L-PE, $U_s=2$ кВ; 1,2/50 мкс. Напряжения u_1 и u_2 контролировались относительно опорной плоскости заземления, для получения разностного сигнала u_{12} использовалась математическая опция осциллографа.

В табл. 1 приведены данные выборок из рабочих осциллограмм.

По данным табл. 1, одноточечный вариант заземления по схеме «звезда» является менее эффективным. Согласно экспериментальным осциллограммам, переходное напряжение достигает амплитудного значения в момент времени, когда крутизна нарастания тока максимальна. Амплитуда напряжения

Табл. 1. Результаты измерения амплитуды переходных напряжений

| Схема заземления терминала | Тип и параметры заземляющего проводника | Амплитуда переходного напряжения | | | Относительное соотношение | Номер рисунка |
|----------------------------|---|----------------------------------|--------------|---------------|---------------------------|---------------|
| | | U_{M1} , В | U_{M2} , В | U_{M12} , В | | |
| Одноточечная | ПВ-3, l=2 м, S=6 мм ² | 249 | 98 | 186 | 1,9- | Рис. 6, а |
| | АМГ, l=2 м, S=8 мм ² | 239 | 89 | 179 | 2,0 | Рис. 6, б |
| Многоточечная | ПВ-3, l=0,5 м, S=2,5 мм ² | 178 | 77 | 106 | 1,38 | Рис. 7, а |
| | ПВ-3, l=0,25 м, S=6 мм ² | 133 | 80 | 58 | 0,73 | Рис. 7, б |

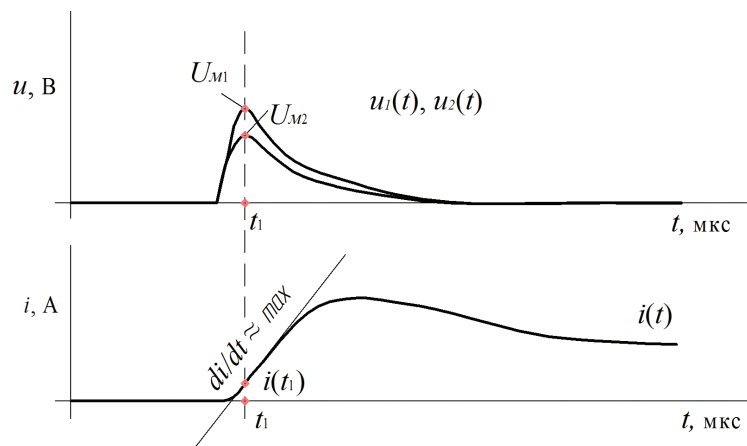


Рис. 5. Временные диаграммы, характеризующие реакцию в результате воздействия микросекундного импульса

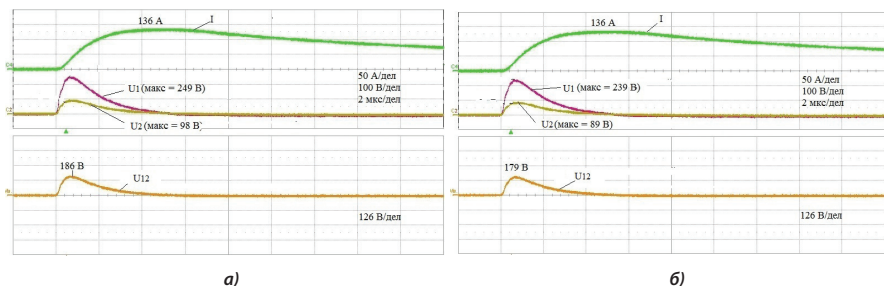


Рис. 6. Рабочие осциллограммы тока и напряжений для варианта одноточечного заземления терминала проводником длиной l=2 м: а – ПВ-3, S=6 мм² и б – АМГ, S=8 мм²; параметры настройки генератора: схема L-PE; U_s=2 кВ; 1/50 мкс

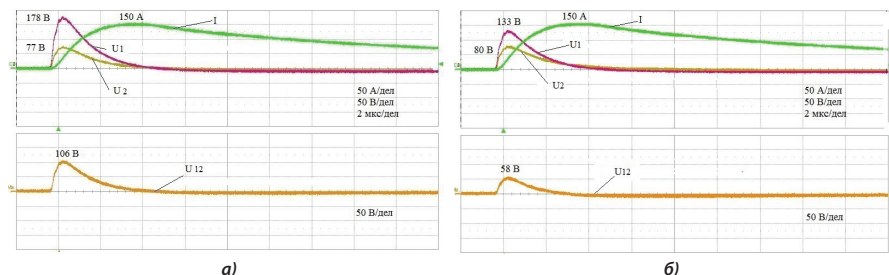


Рис. 7. Рабочие осциллограммы тока и напряжений для варианта многоточечного заземления терминала, связанного с плитой проводником: а – ПВ-3, S=2,5 мм², l=0,5 м и б – ПВ-3, S=6 мм², l=0,25 м; параметры настройки генератора: схема L-PE; U_s=2 кВ; 1/50 мкс



Ильин

Владимир Федорович

Дата рождения: 09.09.1946 г.

Окончил СПбГЭТУ («ЛЭТИ») в 1970 г.,

кафедру промышленной электроники.

В 1983 г. защитил диссертацию в СПбГУТМО на тему «Исследование тиристорных преобразователей постоянного напряжения для вторичных источников питания с высокочастотным

преобразованием параметров электроэнергии».

К.т.н., доцент, главный специалист ООО НПП «ЭКРА».



Ильин

Никита Владимирович

Дата рождения: 24.09.1970 г.

Окончил ФГБОУ ВПО

«Чувашский государственный университет» в 1994 г.,

кафедра: промышленная электроника.

Инженер ООО НПП «ЭКРА».

на участках заземления терминала и шкафа составляют соответственно 186 В и 98 В, крутизна тока – около 100 А/мкс. Соотношение амплитудных величин соизмеримо с отношением длин проводников, заземляющих терминал ($l=2$ м) и шкаф ($l=0,8$ м), и их расчетных индуктивностей. Незначительное расхождение экспериментальных данных для случаев исполнения заземления плоским и круглым проводниками можно отнести к погрешности измерения.

Результаты испытаний показывают, что многоточечный вариант заземления с использованием цельнометаллических элементов конструкции шкафа может иметь заведомо меньшую индуктивность, чем исполнение по одноточечной схеме. Во время воздействия на цепь заземления, исполненной по многоточечной схеме, точно такого же импульса тока, что и для одноточечного исполнения, в точке заземления терминала имеет место ослабленная реакция. В частности, когда терминал соединен с монтажной плитой коротким проводником $l=0,25$ м, амплитуда переходного напряжения составляет 58 В против 179 В для одноточечного варианта с проводником $l=2$ м. Эксперименты с вариацией длины проводников, связывающих терминал с плитой, призваны дать представление о механизме регулирования параметров многоточечного заземления.

Выводы

В шкафах микропроцессорных защит должно проектироваться заземление для обеспечения ЭМС, предусматривающее меры и средства зонирования, экранирования и выравнивания потенциалов с использованием эквипотенциальных плоскостей. Заземление для обеспечения ЭМС не исключает функции защиты, но может быть реализовано независимо от защитного заземления.

Согласно результатам экспериментальных исследований, проведенных с использованием специализированного имитатора помех, и методики, практикуемой при тестировании в области ЭМС, многоточечный вариант заземления с использованием цельнометаллических элементов конструкции шкафа может обеспечить снижение индуктивности цепи заземления и существенно ослабить негативную реакцию на импульсные помехи.

Литература

1. Денисенко В.В. Заземление в системах промышленной автоматизации // Современные технологии и автоматизации. 2006. № 2. С. 94-99; № 3. С. 76-92.
2. Кечиев Л.Н., Акбашев Б.Б., Степанов П.В. Экранирование технических средств и экранирующие системы. - М.: ООО «Группа ИТД», 2010. 470 с.
3. Агафонов А.М., Воршевский А.А. Заземление технических средств при наносекундных и микросекундных импульсных помехах // Технология ЭМС. 2010. №4 (35). С. 44-54.
4. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. – М.: Энергия, 1970. 380 с.
5. ГОСТ Р 51317.4.5-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний.