

Работа выполнена в ОАО «НИИ вычислительных комплексов им.М.А.Карцева»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Колосов Валерий Алексеевич**

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор **Смольников Леонид Евгеньевич** (ОАО «ИНЭУМ»);
- кандидат технических наук **Заика Пётр Никанорович** (Ассоциация «Электропитание»)

Ведущая организация: ФГУП НИИ «Квант»

Защита состоится «__» _____ года в ____ часов на заседании диссертационного совета **К409.009.01** при ОАО «Институт электронных управляющих машин» по адресу: 119334, г. Москва, ул. Вавилова, д.24, ИНЭУМ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан «__» _____ 2006 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук, профессор

В.Е.Красовский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность.

Средства вычислительной техники (СВТ) находят все большее применение в различных отраслях промышленности и народного хозяйства. Уровень сложности и значимости задач, возлагаемых на электронные и вычислительные устройства и системы, в ряде случаев крайне высокий. Последствия в результате отказов технических средств из-за воздействия электромагнитных помех могут составлять существенные материальные потери, нести угрозу безопасности и жизни пользователя. Исследование вопросов устойчивости СВТ к электромагнитным помехам является необходимым и актуальным аспектом развития современной техники.

В условиях все возрастающего потребления электроэнергии требования к качеству электроэнергии, как фактору, во многом определяющему безотказное функционирование СВТ, должны соответствовать ГОСТ 13109-97 и ряду других стандартов. Наличие нормативных документов позволяет создавать разнообразное имитационное оборудование с возможностью унификации подхода к задачам сертификации приемников электроэнергии по устойчивости к помехам в сетях электропитания (сетевым помехам).

Несмотря на значительное улучшение в последние годы ситуации в области исследования сетевых помех, задачи устойчивости СВТ к их воздействию не могут иметь эффективного решения при подходе, основанном только на использовании существующих нормативных требований и соответствующих им имитационных технических средств. Необходимо проведение более широких исследовательских работ по поиску опасных видов и параметров помех и предотвращения нежелательных последствий, в частности, при защите СВТ от высоковольтных импульсных помех, представляющих собой один из наиболее опасных видов сетевых помех.

Анализ путей решения данной проблемы выявил ряд обстоятельств, определяющих необходимость создания имитаторов сверхнормативных высоковольтных импульсных помех с перестраиваемыми параметрами, вспомогательного оборудования и методик для исследования сетевых помех. Эти обстоятельства обусловлены:

- реальным наличием в сетях электропитания высоковольтных импульсных помех с измененными, как правило, в сторону увеличения, значениями параметров, или других, по отношению к нормированным, видов импульсных помех;
- необходимостью определения граничных значений устойчивости и стойкости ответственных СВТ для оценки надежности их работы при питании от электрических сетей с нестандартными показателями качества электроэнергии;
- требованиями выявления элементов и функциональных узлов СВТ, наиболее подверженных воздействию сетевых помех;
- необходимостью пересмотра ранее принятых структурных, схемотехнических и конструктивных решений, ориентированных на СВТ с учетом лишь выполненных нормированных требований;
- необходимостью исследований существующей и новой защитной аппаратуры для СВТ от импульсных сетевых помех .

Таким образом повышение надёжности функционирования СВТ при воздействии на неё высоковольтных импульсных помех из сетей электропитания является важной народнохозяйственной проблемой, определяющей актуальность настоящей работы.

Целью настоящей работы является исследование влияния на приемники электрической энергии (ПЭЭ), включая СВТ, высоковольтных импульсных помех, характеризующихся значениями основных параметров, отличающимися от регламентируемых действующими стандартами.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие

задачи:

- анализ параметров сетевых высоковольтных импульсных помех с разработкой требований к имитаторам сверхнормативных помех с перестраиваемыми параметрами;
- проведение исследований средствами компьютерного моделирования и эксперимента процессов воздействия импульсных помех из сети электропитания на современные источники вторичного электропитания и защитные сетевые устройства;
- создание имитаторов сверхнормативных высоковольтных импульсных помех с перестраиваемыми параметрами;
- подготовка методик и оборудования для проведения экспериментальных исследований высоковольтных импульсных помех на СВТ;
- разработка эффективных устройств защиты СВТ от сетевых высоковольтных импульсных помех.

Положения, выносимые на защиту:

- присутствие в сетях электропитания 220В, 50Гц высоковольтных импульсных помех, в том числе от электромагнитных воздействий искусственного происхождения (индустриальные помехи), с параметрами, превышающими регламентируемые стандартами, при отсутствии специальных мер защиты приводят к сбоям в работе СВТ и выходам их из строя;
- источники вторичного электропитания (ИВЭ) современных СВТ при прохождении через них высоковольтных импульсных помех представляют собой высокоэффективные сетевые защитные устройства при уровнях возмущающих воздействий, не достигающих порогов разрушения электрорадиоэлементов ИВЭ;

- низкая степень защищенности СВТ от промышленных импульсных помех с параметрами, превышающими нормированные стандартами, требует разработки новых эффективных средств защиты, примером которых является разработанное устройство защиты типа БЗС, обеспечивающее при значительной схемотехнической простоте гарантированную защиту СВТ от мощных высоковольтных импульсных помех с длительностями от десятков наносекунд до единиц миллисекунд и амплитудами до нескольких киловольт;
- предложенный новый вариант построения имитаторов сверхнормативных импульсных помех с использованием транзисторного ключа во входной цепи сети электропитания обеспечивает экспериментальные исследования СВТ и других ПЭЭ в широких диапазонах перестройки параметров импульсных воздействий.

Обоснованность и достоверность научных положений, представленных в диссертационной работе, обусловлены их подтверждением экспериментами и компьютерным моделированием, а также опытом эксплуатации разработанных сетевых защитных устройств и имитаторов сверхнормативных импульсных помех с перестраиваемыми параметрами.

Методы исследования.

При решении поставленных задач использованы методы теории электрических цепей, математического анализа, прикладные программы MathCad, P-Spise (Orcad), Electronic WorkBench Pro. Достоверность основных научных положений, расчетов по результатам компьютерного моделирования подтверждена экспериментальными исследованиями на физических моделях.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель процессов прохождения индустриальных сверхнормативных высоковольтных импульсных помех в тракте источника вторичного электропитания – высокочастотного преобразователя напряжения, позволяющая получать количественные значения параметров возмущающих воздействий на элементы ИВЭ.
2. Выполнен анализ процессов в разработанном сетевом защитном устройстве (СЗУ) от высоковольтных сетевых импульсных помех на основе мощных современных варисторов и быстродействующих плавких вставок.
3. Предложена новая структура построения имитаторов сверхнормативных импульсных помех с использованием электронного ключа во входной цепи сети электропитания.
4. Проведено компьютерное моделирование предложенного имитатора сверхнормативных импульсных помех с перестраиваемыми параметрами при его работе на комплексную нагрузку с выбором варисторов, защищающих элементы схемы от перенапряжения.

Практическая значимость работы.

На основе проведенных исследований разработаны, изготовлены и внедрены в изделия ОАО «НИИВК им. М.А.Карцева»:

- сетевые защитные устройства типа БЗС, позволяющие ограничивать импульсные помехи большой энергии до допустимого уровня и обеспечивать быстрое отключение источника помехи от защищаемого оборудования;
- имитаторы импульсных помех микро- и миллисекундного диапазонов для испытаний на устойчивость СВТ к электромагнитным помехам в виде высоковольтных импульсов

напряжения, приходящих из сети электропитания, выполняющих ряд функций сверх задаваемых в стандартах.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных конференциях молодых специалистов в ОАО «НИИВК им. М.А.Карцева» в период с 2001 по 2006 г.г.; на Всероссийской конференции «Устройства и системы энергетической электроники», г.Москва, 2002 г.; на Международной научно-технической конференции «Молодые ученые 2003», г.Москва, 2003г.; на конференции «Источники вторичного электропитания –2005», г. Москва, 2005г.; на научно-технической конференции «Высокие технологии XXI века», г.Москва, 2006г.; на 11-ой научно-технической конференции по средствам электропитания, г. С.-Петербург, 2006 г.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 5-и приложений. Текст диссертации изложен на 141 странице, содержит 12 таблиц, 55 рисунков, список литературы, включающий 82 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана ее научная новизна, практическая значимость результатов работы. Приведены положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Кондуктивные помехи в сетях электропитания

С целью проведения анализа воздействия сетевых высоковольтных импульсных помех на СВТ и постановки задач по разработке сетевых защитных устройств (СЗУ) и имитационной аппаратуры рассмотрены виды сетей электропитания. Основным вариантом трехфазной распределительной

сети является четырехпроводная сеть (три фазных и один нейтральный провод) с напряжением 380/220В (линейное/фазное), из которой организуются однофазные распределительные сети.

В трехфазных сетях электропитания (СЭП) на приемники электрической энергии (ПЭЭ) действуют два основных вида кондуктивных помех: внешние и внутренние. Кондуктивные помехи, действующие в СЭП, могут быть классифицированы по частотному диапазону: высоко- и низкочастотные; по амплитуде: высоко- и низковольтные; по длительности: кратковременные и продолжительные; по величине энергии: большой и малой энергии.

Особо опасной разновидностью промышленных электромагнитных воздействий, присутствующих в сетях электропитания, являются помехи в виде высоковольтных импульсов с длительностями, лежащими в диапазоне микро-миллисекунд. Серьезную угрозу для СВТ представляют сверхнормативные промышленные электромагнитные импульсные воздействия, о возможности появления которых в СЭП в последние годы предостерегают многие исследователи.

Наиболее распространенной для анализа сетевых воздействий принимают помеху в виде экспоненциального импульса. На рис.1. приведена такая помеха с амплитудой 1кВ и длительностью на уровне 0,5 от амплитудного значения около 2мс.

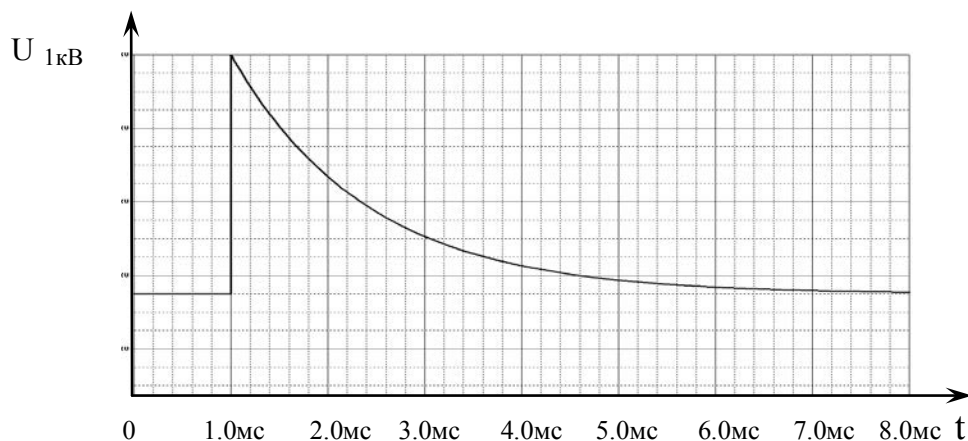


Рис.1. Экспоненциальная импульсная помеха

Для нахождения параметров импульсов различного вида пользуются выражением для спектральной функции, соответствующей импульсу $u(t)$:

$$G_u(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

После ряда преобразований выводится соотношение для определения энергии экспоненциального импульса:

$$\mathcal{E}_y = \int_{-\infty}^{+\infty} u^2(t) dt = \int_0^{+\infty} I E e^{-\alpha t} I^2 dt = E^2 \frac{e^{-2\alpha t}}{-2\alpha} \Big|_0^{+\infty} = \frac{E^2}{2\alpha} \quad (2)$$

При $E=1$ кВ, $\alpha = \frac{1}{RC} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ 1/с получаем $\mathcal{E}_y=1$ кДж.

Проведен обзор стандартов по помехам в СЭП, возникающим в результате грозových разрядов и коммутационных процессов в аппаратуре, имеющей гальваническую связь с СЭП и через электромагнитные поля связь с СЭП. Изложены основные сведения и определения, используемые в области электромагнитной совместимости. Перечислены действующие стандарты по параметрам помехоустойчивости. Сделан вывод о наличии в сетях электропитания «сверхнормативных» импульсных помех и необходимости создания новых СЗУ и специальных имитаторов сетевых высоковольтных импульсных помех.

Глава 2. Исследование процессов воздействия импульсных сетевых помех на СВТ

Рассмотрены вопросы, связанные с прохождением через СЭП внешних по отношению к СВТ импульсных кондуктивных помех.

Показано, что с целью предварительной отработки методик и средств для проведения последующих натурных исследований следует априорно применять методы компьютерного моделирования.

Дан анализ пакетов программ, которые могут быть использованы для исследования предложенных электротехнических моделей СЭП и ИВЭ.

Проведен анализ воздействия импульсных помех средствами компьютерного моделирования и эксперимента на примере источника вторичного электропитания – высокочастотного преобразователя напряжения с бестрансформаторным входом. Сделан вывод о значительной эффективности ИВЭ, выполняющего функцию сетевого защитного устройства. На рис.2а,б; рис.3а,б приведены примеры осциллограмм, полученные математическим моделированием и экспериментально соответственно на входе ИВЭ и на выходе инвертора ИВЭ.

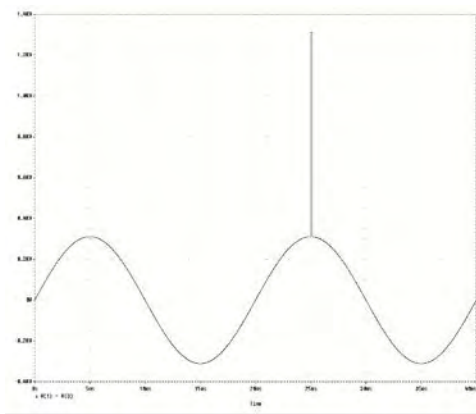


Рис.2а

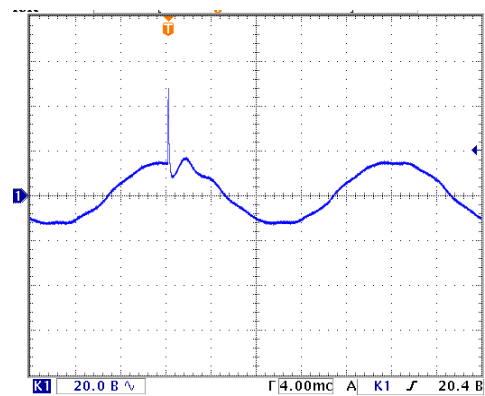


Рис.2б

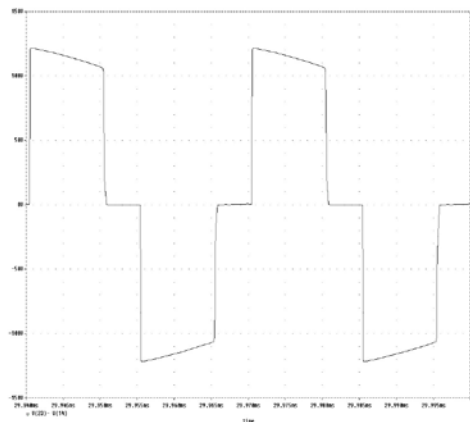


Рис.3а

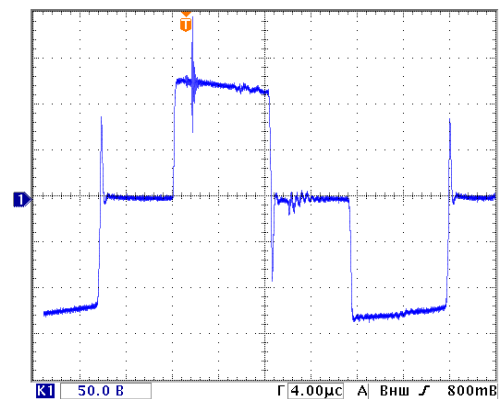


Рис.3б

Получены расчетные осциллограммы также в других точках схемы ИВЭ при различных параметрах импульсных помех.

Глава 3. Анализ сетевых устройств защиты от высоковольтных импульсных помех

Приведен обзор современных средств защиты от импульсных помех, на основе которого сделан вывод о недостаточной защищенности СВТ от промышленных электромагнитных воздействий с параметрами, превышающими регламентируемые стандартами. Исследован ряд устройств защиты компьютерной и оргтехники: коммутационно-защитные устройства, источники бесперебойного питания, сетевые высокочастотные фильтры.

На рис.4 представлена упрощенная электрическая схема разработанного сетевого защитного устройства типа БЗС.

Получена система дифференциальных уравнений, описывающая представленную схему БЗС. В расчетах учтена зависимость сопротивления плавкой вставки от тока $R_{FU1}(I_c)$

$$\begin{cases} I_c(t) - I_{V1}(t) - I_{CH}(t) - I_{RH}(t) = 0 \\ U_c(t) + U_{и}(t) = I_c(t) \cdot [R_c + R_{FU1}(I_c) + X_{L1}] \\ U_H(t) = U_{V1}(I_{V1}) = I_{CH}(t) \cdot X_{CH} = I_{RH}(t) R_H \end{cases} \quad (3)$$

На рис.5 приведены расчетные осциллограммы переходных процессов в схеме БЗС. Эксперименты совпадают с расчетами в диапазоне 15...20%.

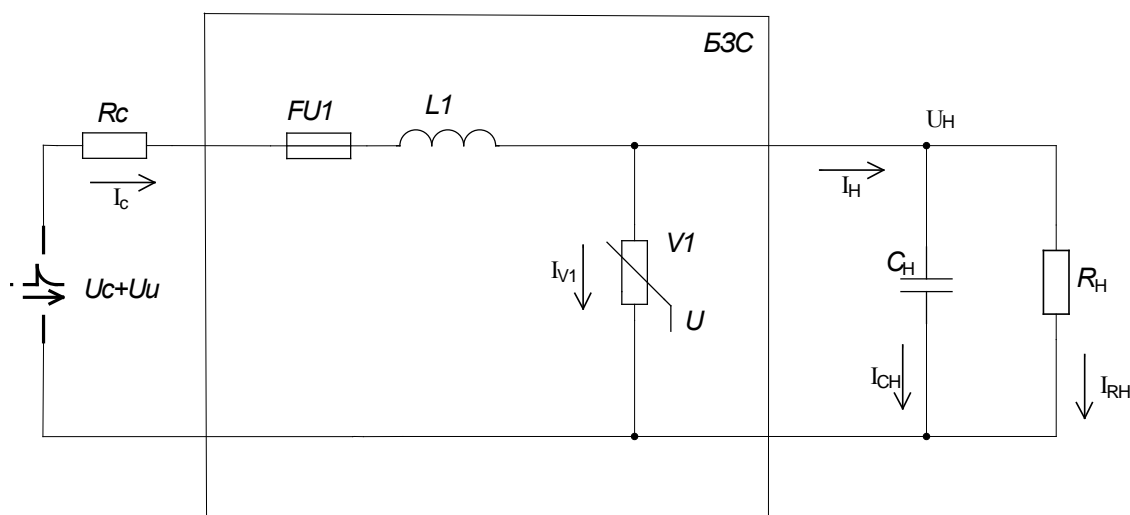


Рис.4. Упрощенная электрическая схема БЗС с входными и выходными цепями

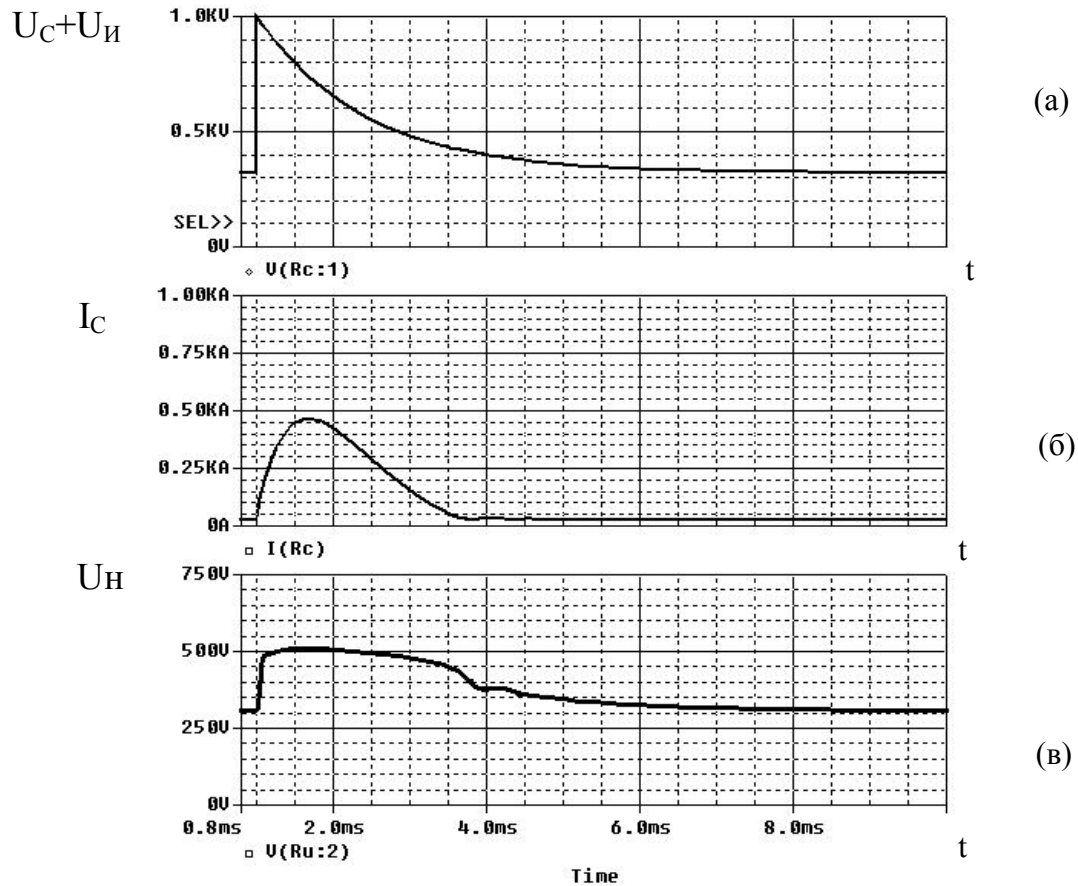
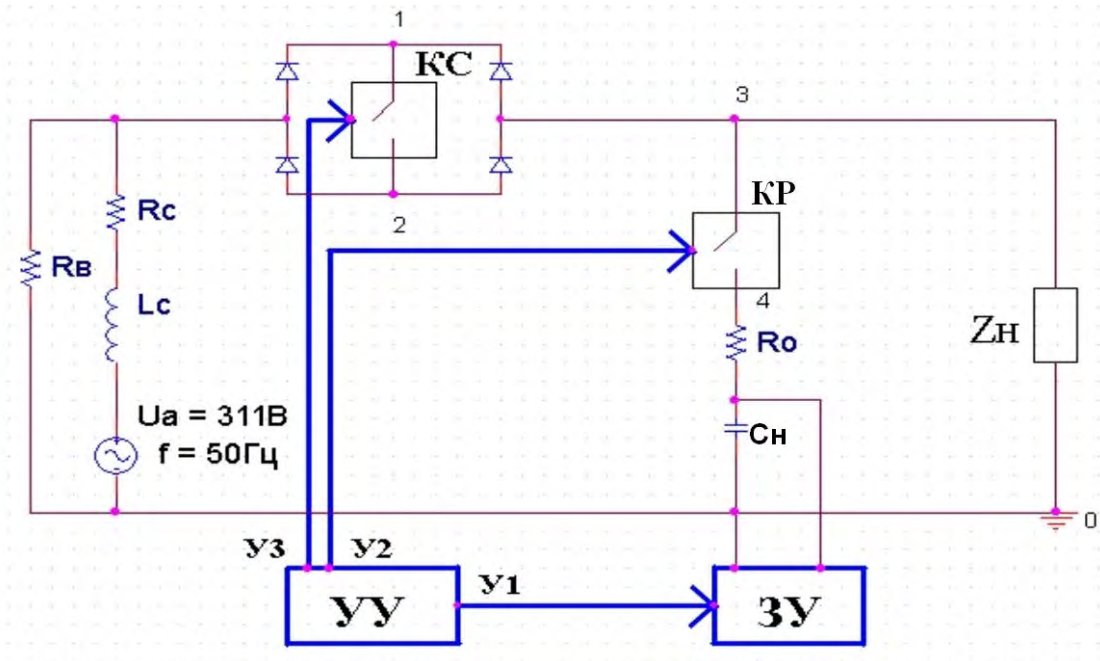


Рис.5. Переходные процессы сетевого напряжения ($U_C + U_H$) - (а), сетевого тока I_C - (б) и напряжения в нагрузке U_H - (в)

Глава 4. Имитаторы сверхнормативных высоковольтных сетевых импульсных помех с перестраиваемыми параметрами

Проведен анализ задач, решение которых необходимо с помощью имитаторов промышленных сверхнормативных импульсных помех с перестраиваемыми параметрами. Сформулированы технические требования по их разработке. Описан новый предложенный вариант построения имитаторов сетевых помех с использованием транзисторного ключа во входной цепи сети электропитания. На рис.6 приведена блок-схема модели имитатора сверхнормативных импульсных помех (ИСИП) по полученному патенту РФ на полезную модель.



ЗУ – зарядное устройство;

УУ – устройство управления;

КС, КР – ключи сетевой и разрядный;

R_c, L_c – эквивалентные сопротивление и индуктивность сети;

R_b – балластное сопротивление сети;

C_n – накопительный конденсатор;

R_o – ограничительное сопротивление;

Z_n – комплексная нагрузка.

Рис.6. Блок-схема модели ИСИП

На рис.7 показана временная диаграмма работы ИСИП при фазе формирования импульса 90° , где:

U_c – напряжение сети;

U_n – амплитуда импульса помехи;

$t_{\text{пн}}$ – время задержки прихода управляющего сигнала УЗ на закрывание КС (может изменяться от 0 до 10 мс);

t_n – длительность импульса помехи (время открытого состояния КР);

t_3 – время закрытого состояния КС;

T – период синусоидального сетевого напряжения, равный 20 мс.

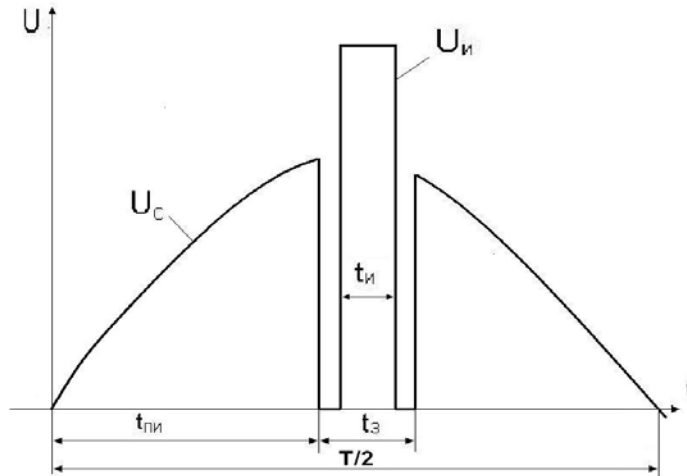


Рис.7. Временная диаграмма работы ИСИП

На время t_3 с помощью ключа КС напряжение сети электропитания отключается. В этот промежуток времени в фазу сети с помощью ключа КР «вставляется» импульс помехи с длительностью $t_И$. Зазоры между t_3 и $t_И$ выбираются минимальными, исходя из длительности переходных процессов (выбросов обратных напряжений при работе ИСИП на активно-индуктивную нагрузку), формирующихся при закрытии ключей КС и КР.

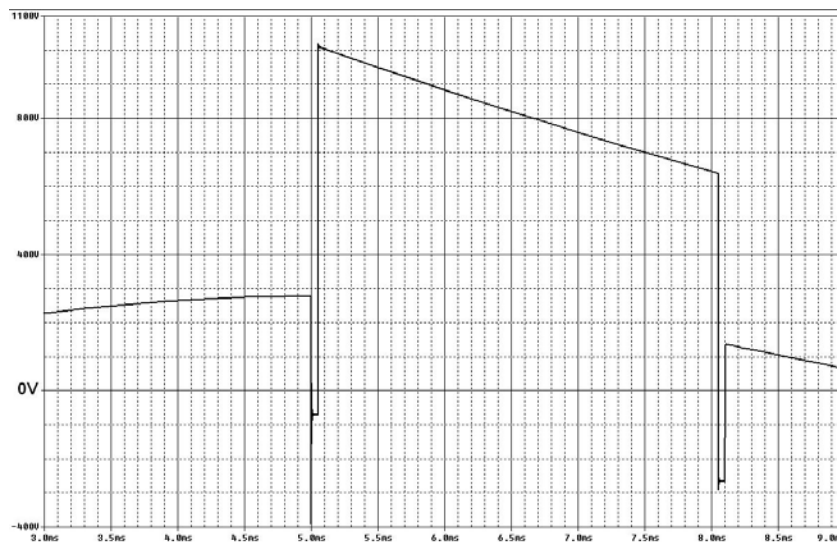


Рис.8. Расчетная осциллограмма напряжения на Z_n

На рис.8 показана расчетная осциллограмма напряжения на комплексной нагрузке, где:

Z_H – параллельное включение $R_H=22 \text{ Ом}$, $L_H=270 \text{ мГн}$;

$U_{и} = 1,5 \text{ кВ}$ (напряжение от ЗУ на конденсаторе $C_{и}$);

$t_{и} = 3 \text{ мс}$; $R_C = 0,25 \text{ Ом}$ $C_H = 300 \text{ мкФ}$ $t_{пи} = 5 \text{ мс}$;

$L_C = 300 \text{ мкГн}$ $R_0 = 90 \text{ Ом}$ $t_3 = 3,1 \text{ мс}$ $R_B = 100 \text{ Ом}$

Амплитуда отмеченных выбросов может превышать допустимые значения для транзисторов, входящих в КС, КР. Основная задача моделирования: определение параметров перенапряжений на транзисторах ключей, позволяющее выбрать варисторы для ограничения выбросов в пределах допустимых значений.

На рис.9,10 приведены расчетные осциллограммы соответственно напряжений на КС и КР.

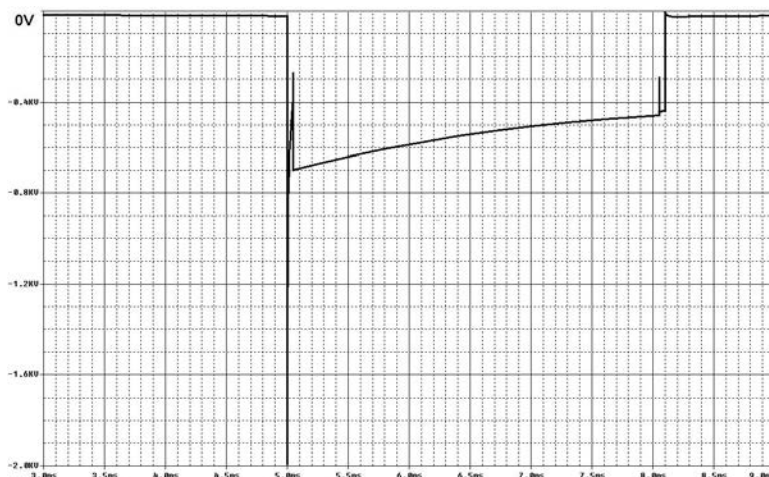


Рис.9. Расчетная осциллограмма напряжения между точками 1 и 2 схемы ИСИП

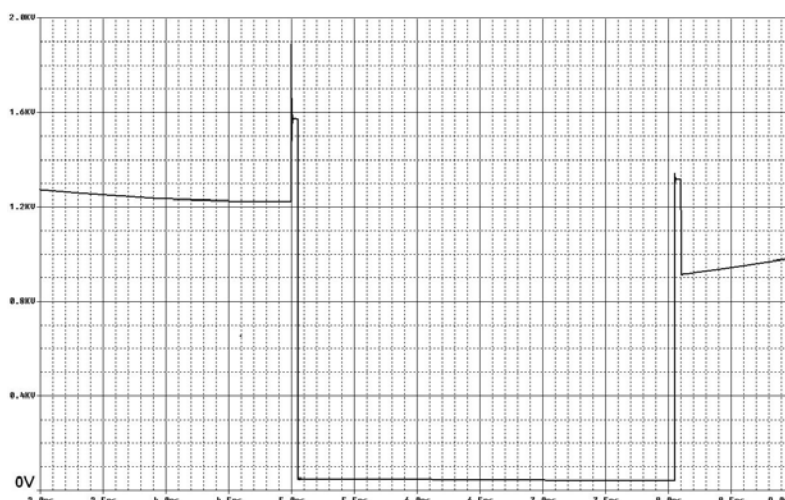


Рис.10. Расчетная осциллограмма напряжения между точками 3 и 4 ИСИП

Заключение содержит перечень основных результатов, полученных при выполнении диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Показана возможность присутствия в сетях электропитания СВТ высоковольтных импульсных помех, в том числе помех индустриальных электромагнитных воздействий, с параметрами, значительно превышающими регламентируемые действующими стандартами.

2. Выполнено компьютерное моделирование переходных процессов и проведены эксперименты при воздействии высоковольтных сетевых импульсных помех на ИВЭ, устанавливаемые в современных СВТ. Сделаны выводы о эффективности ИВЭ как средства защиты от импульсных помех при параметрах помех, не превышающих уровни разрушения электрорадиоэлементов ИВЭ.

3. Проведено исследование характеристик ряда выпускаемых отечественных и зарубежных сетевых защитных устройств. На базе выполненных расчётных и экспериментальных результатов разработано сетевое защитное устройство типа БЗС, снижающее до допустимого уровня импульсные помехи или отключающее СВТ от сети электропитания.

4. Разработаны технические требования к имитаторам сверхнормативных высоковольтных импульсных помех с перестраиваемыми параметрами. Предложен вариант построения имитатора сетевых высоковольтных импульсных помех без применения дросселя во входной цепи сети электропитания, позволивший улучшить объемно-массовые показатели устройства и полностью исключить прохождение импульсной помехи в направлении входа сети электропитания.

5. Результаты исследований в области сетевых высоковольтных импульсных помех использованы в разработанных сетевых защитных устройствах и в имитаторах высоковольтных импульсных помех милли- и микросекундных диапазонов.

Опубликованные работы по теме диссертации

1. Колосов В.А., Либенко Ю.Н., Парфенов А.В. Экспериментальные исследования помех в сетях электропитания. Тезисы докладов IV Всероссийской научно-технической конференции «Устройства и системы энергетической электроники – УСЭЭ-2002». Москва, 2002 г. – с. 6-10.
2. Парфенов А.В. Организация измерительно-управляющей части испытательного стенда для исследования помех, присутствующих в сетях электропитания. «Вопросы радиоэлектроники». Серия ЭВТ. Вып. 2, 2003 г. – с.115-120.
3. Парфенов А.В., Стюнин А.В. Устройства защиты РЭА от помех в сетях электропитания. Международная научно-техническая школа-конференция «Молодые ученые-2003». Москва, 2003 г. – с.236.
4. Колосов В.А., Мухтарулин В.С., Парфенов А.В., Стюнин А.В.. Организация систем вторичного электропитания для современной цифровой аппаратуры. Научно-технический сборник «Электропитание». Вып. 5. Москва, 2003 г. – стр.30-42.
5. Еременко В.Г., Жирнова Н.Б., Липкин Г.Л, Парфенов А.В., Стюнин А.В. Моделирование импульсного источника вторичного электропитания. Научно-технический журнал «Практическая силовая электроника». Вып. 17, Москва, 2005 г. – с 12-19.
6. Колосов В.А., Либенко Ю.Н., Богословский Д.Е., Парфенов А.В., Липкин Г.Л. Моделирование имитаторов сетевых импульсных помех. Научно-технический журнал «Электрическое питание» Вып. 5, Санкт-Петербург, 2005 г. – стр.54 –60

7. Колосов В.А., Либенко Ю.Н., Парфенов А.В. Технические средства для исследования сетевых помех. Научно-технический журнал «Электрическое питание». Вып. 5, Санкт-Петербург, 2005 г. – с.127-132.
8. Либенко Ю.Н., Парфенов А.В. Методы повышения надежности устройств электропитания с помощью комплекса аппаратуры имитации сетевых помех. Тезисы докладов конференции «Источники вторичного электропитания –2005», Москва, 2005г.– с.3 –7.
9. Парфенов А.В. Разработка средств тестирования основных функциональных частей аппаратуры имитации сетевых помех. «Вопросы радиоэлектроники». Серия ЭВТ. Вып.2. 2006 г. – с.87 – 91.
10. Парфенов А.В. Анализ воздействий высоковольтных импульсов из сети электропитания постоянного тока на устройства вычислительной техники. Сборник трудов научно технической конференции «Высокие технологии XXI века». Москва, 2006 г. – с.127–132.
11. Колосов В.А., Либенко Ю.Н., Парфенов А.В. Устройство формирования импульса перенапряжения на входе электропитания испытуемой РЭА, питающейся от сети переменного тока. Патент РФ на полезную модель №52194. Приоритет от 20.05.05.
12. Колосов В.А., Либенко Ю.Н., Парфенов А.В., Бурцев Л.Б., Денисов И.М., Иванова О.В. Расчет сетевого защитного устройства типа БЗС-30А-350В. Научно-технический сборник «Электропитание». Вып.6. Санкт-Петербург, 2006 г. – с.54-60.