

На правах рукописи

НЕЙЧЕВ Олег Владимирович

УДК 621.351

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ
ЦИФРОВЫХ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

05.12.13 - Устройства радиотехники и средств связи

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Робота виконана на кафедрі
Харьковского института инженеров



00814820 (N)

Научные руководители - кандидат технических наук,
доцент Варбанец Н.Г.;
кандидат технических наук,
доцент Кустов В.Ф.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Загарий Г.И.;
кандидат технических наук,
доцент Кравченко В.И.

Ведущая организация - НПП САУ (г. Харьков)

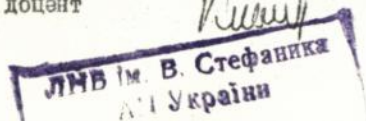
Защита состоится "30" июня 1993 г. в 15 часов
на заседании специализированного совета Д ИА.04.02
при Харьковском институте инженеров железнодорожного транспорта
по адресу: 310050, г. Харьков-50, пл. Фейербаха, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "26" мая 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
К.Т.Н., доцент

Кнышев И.П.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работ. Современный этап развития науки и техники характеризуется широким внедрением средств вычислительной техники в промышленность, транспорт, банковское дело и т.д. Обладая высоким быстродействием, малой энерго- и материалоемкостью, широкими функциональными возможностями микроэлектронные цифровые технические средства (ЦТС) становятся основной технической базой для создания систем связи, управления, энергоснабжения, а также информационных и измерительных систем.

Растущие требования производства к автоматическим и автоматизированным системам управления, системам передачи и обработки данных требуют повышения надежности и качества их работы.

На транспортных и промышленных объектах, предприятиях энергетического комплекса в условиях жесткой электромагнитной обстановки (ЭМО) надежность микроэлектронных ЦТС в значительной степени определяется их защищенностью от воздействия помех. Элементная база ЦТС насыщена запоминающими и формирующими схемами и характеризуется чрезвычайно малой энергией полезных сигналов. В настоящее время эта энергия на 5-6 порядков ниже энергии помех из сети питания и окружающего пространства. Данное обстоятельство потенциально обуславливает заметную восприимчивость ЦТС к внешним помехам. Поэтому повышение эксплуатационной надежности микроэлектронных устройств невозможно без обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) ЦТС с внешней средой — выполнения комплекса мероприятий, направленных на повышение помехозащищенности (ПЗ) устройств и подавление помех, создаваемых ЦТС. Сложность задач по обеспечению ЭМС предполагает поэтапное решение проблемы. На первом этапе (разработка конструкторской документации) принимаются решения по корректному, с точки зрения ЭМС, вводу в ЦТС информационных кабелей и кабелей питания, рациональному размещению "чистых" и помехонесущих цепей, их гальванической развязке, экранированию и т.д. Поскольку параметры электромагнитных помех, цели их распространения внутри корпуса ЦТС имеют случайный характер,

не представляется возможным априорно, до проведения испытаний на ПЗ определить фактический уровень помехозащищенности микроэлектронного устройства, а также требуемую эффективность помехоподавляющих средств. Эти задачи должны решаться на втором этапе – при испытаниях опытного образца.

Однако несовершенство методов испытаний на ПЗ, норм на восприимчивость к помехам, недостаточная научная и практическая обоснованность существующих методов разработки требований к помехоподавляющим средствам на основе результатов испытаний создаст опасность ввода в эксплуатацию цифровых микроэлектронных устройств с низким уровнем помехозащищенности. Следствием могут быть сбои и отказы ЦТС, приводящие к значительному материальному ущербу, обусловленному остановками технологических процессов, поврежденными элементами аппаратуры, оборудования и изготавливаемой продукции, потерей ответственной информации и т.д.

Поэтому разработка новых методов определения и средств повышения ПЗ ЦТС в настоящее время является важной и актуальной задачей.

Целью настоящей работы является разработка методов определения восприимчивости микроэлектронной аппаратуры к воздействию помех и требуемой эффективности их ослабления, исследование и разработка оптимальных помехоподавляющих средств.

Основными задачами работы являются:

- анализ методов определения ПЗ микроэлектронных устройств и на его основе выбор оптимальных форм представления информации об уровне помехозащищенности;
- разработка новых методов определения восприимчивости микроэлектронной аппаратуры к воздействию импульсных помех и их гармонических составляющих;
- разработка методики определения требуемой эффективности ослабления помех помехоподавляющими фильтрами (ППФ);
- исследование элементов ППФ и факторов, влияющих на эффективность их работы;
- разработка помехоподавляющих устройств.

Методы исследований. При проведении исследований в работе использованы методы теории передачи сигналов, теории пла-

нирования эксперимента, методы математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, теории электрических цепей.

Достоверность научных положений обоснована и подтверждена;

- экспериментальной проверкой полученных выводов;
- положительными результатами эксплуатации ЦТС, испытанных на ПЗ при помощи предложенных методов и оборудованных разработанными помехоподавляющими средствами.

Научная новизна. Разработаны вероятностный и энергетический методы определения восприимчивости микроэлектронной аппаратуры к воздействию импульсных помех и их гармонических составляющих, методы определения уровня помехозащищенности ЦТС, разработана методика определения требуемой эффективности подавления помех ПШФ на основании данных об уровне ПЗ устройств, полученных в результате испытаний по предложенным методикам и норм на восприимчивость к воздействию помех. Рассмотрены пути использования предложенных методов при обосновании норм на восприимчивость микроэлектронных устройств к помехам, предложены схемы замещения индуктивных помехоподавляющих элементов для расчета эффективности подавления помех фильтрами. Предложены композиционные помехоподавляющие элементы и схемы их замещения. Исследованы факторы, влияющие на эффективность подавления помех индуктивными и композиционными помехоподавляющими элементами, что позволило выделить наиболее значимые и использовать их при разработке ПШФ.

Техническая новизна предложенных индуктивных и композиционных ПШФ подтверждена рядом авторских свидетельств и положительными решениями на изобретения.

Практическая ценность. Полученные в диссертационной работе результаты позволяют повысить достоверность испытаний ЦТС на ПЗ и использовать информацию о помехозащищенности при разработке эффективных помехоподавляющих средств.

На основании результатов исследований разработаны помехоподавляющие устройства для защиты от воздействия электромагнитных помех управляющих ЭВМ, программируемых контроллеров, комплексов технических средств локальных информационно-управ-

ляющих систем различных народно-хозяйственных объектов. Предложены схемы замещения и математические выражения для расчета параметров помехоподавляющих элементов, входящих в состав ШПФ, разработаны рекомендации по повышению ПЗ микроэлектронной аппаратуры локальных систем передачи и обработки информации. Комплексные испытания и опытная эксплуатация разработанных помехоподавляющих устройств показали их работоспособность, эффективность и надежность.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы:

- на Запорожской АЭС для защиты от помех из сети питания и каналов передачи данных управляющей ЭВМ системы внутриреакторного контроля (энергоблоки I - 6);
- научно-исследовательским институтом железнодорожной автоматики (НИИЖА, г. Москва) при создании аппаратуры комплексной локомотивной системы безопасности для железных дорог России и стран СНГ;
- научно-производственным объединением по системам автоматизированного управления (НПП САУ, г. Харьков) при разработке технических средств "МикроДАТ";
- исследовательским институтом КТИМ Агропрома (г. Харьков) при разработке систем управления технологическими процессами в пищевой промышленности.

Апробация работ. Основные результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на:

- Всесоюзной научно-технической конференции "Методы и средства борьбы с помехами в цифровой технике", г. Каунас, 1990 г.;
- научно-технической конференции "Электромагнитная совместимость технических средств", г. Санкт-Петербург, 1992 г.;
- Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы комплексной автоматизации судовых технических средств", г. Санкт-Петербург, 1992 г.;
- республиканской научно-технической конференции "Микропроцессорные системы связи и управления на железнодорожном транспорте", г. Алушта, 1991 г.;
- республиканской школе-семинаре "Микропроцессорные сис-

темы связи и управления на железнодорожном транспорте", г. Алушта, 1992 г.;

- отраслевой научно-технической конференции "Микропроцессорные средства диспетчеризации и управления технологическими процессами", г. Харьков, 1991 г.;

- 51, 52, 53 научно-технических конференциях кафедр ХИИТа и специалистов железнодорожного транспорта, г. Харьков, 1990, 1991, 1992 гг.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 4 авторских свидетельства на изобретения.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованной литературы и приложений. Содержит 150 с. основного текста, 45 рисунков и 17 приложений на 70 с. Библиография включает 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации проведен анализ существующих методов и средств определения ПЗ ЦТС, указаны нерешенные вопросы в проблеме испытаний ЦТС на ПЗ и обеспечении ЭМС микроэлектронных устройств с внешней средой. Определены цель и задачи исследования.

Проведенный анализ показал, что наиболее приемлемым для определения ПЗ ЦТС является проведение испытаний, позволяющих определить степень защиты микроэлектронных устройств от преднамеренно создаваемых помех со стандартизованными параметрами. При фиксированной нормативной вероятности сбоя ЦТС ($P_{сн}$) определение ПЗ сводится к определению амплитуд и длительностей испытательных импульсов, воздействие которых на ЦТС вызывает сбой устройства с заданной вероятностью. Однако при таком подходе неизбежно возникают сложности при определении перечня необходимых параметров помех для их измерения и имитации, часто упускаются параметры, представляющие серьезную опасность для ЦТС в части ЭМС. Это ведет к тому, что при испытаниях воспроизводятся только некоторые, не определяющие реальную ЭМО параметры помех. Кроме того, при разработке требований к помехопо-

давящим средствам, становится проблематичным использование результатов испытаний на ПЗ, представленных в виде амплитуд и длительностей испытательных импульсов, т.к. в этом случае игнорируется спектральный состав помех, невозможны определение диапазона наибольшей восприимчивости ЦТС к гармоническим помехам, а следовательно, и разработка эффективных ШФФ.

Указанные недостатки известных методов испытаний ЦТС на ПЗ таким образом не обеспечивают адекватность воспроизводимых помех реальной электромагнитной обстановке. Естественно, это снижает достоверность испытаний, а ограниченные возможности в использовании их результатов увеличивает риск ввода в эксплуатацию микроэлектронных устройств с низкой ПЗ, возрастает время и затраты на разработку ШФФ. Поэтому возникает задача разработки новых методов определения помехозащищенности ЦТС, восприимчивости к воздействию гармонических составляющих спектра импульсных помех; разработки методик, позволяющих определять на основе результатов испытаний на ПЗ рабочий диапазон и требуемую эффективность ШФФ; разработки средств обеспечения ЭМС ЦТС с внешней средой.

Вторая глава диссертации посвящена разработке новых методов определения ПЗ ЦТС и их использованию при разработке помехоподавляющих фильтров. Поскольку наиболее приемлемыми при оценке ПЗ являются методы, основанные на определении восприимчивости устройств к искусственно воспроизводимым импульсным помехам, в основу предлагаемых методов также положен этот принцип. Однако в отличие от традиционных, разработанные (вероятностный и энергетический) методы определения ПЗ основаны на спектральном представлении импульсных помех с амплитудой A и длительностью τ , воздействие которых на сетевые и информационные входы испытываемого устройства вызывает его сбой с вероятностью не выше заданной.

Введено понятие пороговых импульсов, воздействие которых на входы микроэлектронного устройства вызывает его сбой с нормативной вероятностью $P_{\text{норм}}$. Причем амплитуды импульсов имеют предельные минимальные значения, ниже которых вероятность сбоя становится меньше нормативной. При различных формах, длительностях и амплитудах пороговых импульсов их спектральный состав

различен.

На формирование условий, вызывающих сбои микроволновое устройство, в разной мере оказывают влияние все составляющие спектра испытательного импульса. Чем больше значение спектральной плотности помехи на отдельной частоте и чем выше восприимчивость аппаратуры на этой частоте, тем больше вероятность сбоя, вызванного воздействием этой гармонической составляющей спектра. При определении помехозащищенности ЦТС вероятностным методом предполагается, что любой гармонический сигнал с комплексной амплитудой ΔA_{fi} на частоте f_i при некоторой фиксированной восприимчивости аппаратуры F_i на указанной частоте будет приводить к сбою с вероятностью

$$p_i = \Delta A_{fi} F_i \quad (1)$$

С учетом того, что $\Delta A_{fi} = S(f_i) \Delta f_i$,

$$p_i = S(f_i) \Delta f_i F_i \quad (2)$$

где $S(f_i)$ — спектральная плотность помехи на частоте f_i ,
 Δf_i — шаг квантования по частоте.

Физической интерпретацией приведенного уравнения может быть следующая: внутренняя структура микроволнового устройства представляет собой совокупность параллельно включенных узкополосных каналов, соединяющих подверженный влиянию помех вход и некоторый рецептор. Чем шире полоса пропускания канала Δf_i , чем больше его "пропускная способность" F_i и значение спектральной плотности помехи на данной частоте $S(f_i)$, тем большая часть энергии импульса может проникнуть к рецептору и с большей вероятностью переключить его.

При воздействии помех со значениями спектральной плотности $S_j(f_i)$ j -го испытательного импульса на частоте f_i вероятность устойчивого функционирования ЦТС

$$P_{\text{бси}} = 1 - p_i \quad (3)$$

$$P_{\text{бси}} = 1 - S(f_i) F_i \Delta f_i \quad (4)$$

Вероятность бесбойного функционирования устройства при воздействии на его вход пороговых импульсов с амплитудами A_j и длительностями τ_j

$$P_{\text{бс}} = 1 - P_{\text{с}}(A_j, \tau_j) . \quad (5)$$

Очевидно, что при воздействии на испытуемое устройство помехи с некоторыми параметрами A и τ обой ЦТС не наступит только тогда, когда одновременное воздействие всех составляющих спектра не приведет к сбою ни на одной частоте. Применительно к рассматриваемому случаю вероятность появления подобного события равна произведению вероятностей "бесбойных" исходов $P_{\text{бс}i}$ на частотах

$$(1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3) \dots (1 - p_n) = 1 - P_{\text{с}}(A, \tau) . \quad (6)$$

С учетом (4)

$$(1 - S(f_1)F(f_1)\Delta f_1)(1 - S(f_2)F(f_2)\Delta f_2) \dots (1 - S(f_n)F(f_n)\Delta f_n) = 1 - P_{\text{с}}(A, \tau) . \quad (7)$$

В уравнении (7) неизвестными являются значения восприимчивости ЦТС к гармоническим составляющим помех $F(f_i)$. Поскольку уравнение содержит n неизвестных, для определения их значений необходимо составить и решить систему из n уравнений. Каждое уравнение вида (7) может быть получено после определения значений спектральных плотностей n различных пороговых испытательных импульсов.

Найденная в результате решения системы уравнений

$$\begin{cases} 1 - \int_{f_1}^n (1 - S_1(f_i)F(f_i)\Delta f_i) = P_{\text{норм}}(A_1, \tau_1) , \\ 1 - \int_{f_1}^n (1 - S_j(f_i)F(f_i)\Delta f_i) = P_{\text{норм}}(A_j, \tau_j) , \\ 1 - \int_{f_1}^n (1 - S_n(f_i)F(f_i)\Delta f_i) = P_{\text{норм}}(A_n, \tau_n) . \end{cases} \quad (8)$$

зависимость $F(f)$ восприимчивости аппаратуры выражает вероятность сбоя устройства гармоническими составляющими спектра помехи с некоторой единичной амплитудой при нормативной результирующей вероятности сбоя. Функция $F(f)$ может быть использо-

вана как показатель уровня ПЗ любого микроэлектронного устройства. Характер зависимости $F(f)$ на частотах $f_1 \div f_n$ позволяет определить диапазон максимальной чувствительности ЦТС к гармоническим составляющим помех и обеспечить эффективное подавление помех на этих частотах.

Однако при значениях нормативной вероятности сбоя менее, чем $0.5 \cdot 10^{-6}$, расчет $F(f_i)$ сопряжен с операциями над малыми числами порядка $10^{-8} \div 10^{-10}$, а следовательно, и значительными погрешностями расчета. Чтобы избежать снижения точности расчета, целесообразно перейти к иному представлению информации о ПЗ цифровых систем, предложенному в ходе разработки энергетического метода определения помехозащищенности. Вместе с тем, при испытаниях микроэлектронных и электротехнических устройств с заданной нормативной вероятностью сбоя $P_{\text{норм}} \rightarrow 1$ или же с ярко выраженной пороговой зависимостью $P_{\text{сб}}(U_n)$, когда невозможно определить параметры импульсных помех, обеспечивающих собой ЦТС с вероятностью $P_{\text{норм}} = 0.5 + 1.0 \cdot 10^{-6}$ (по РТМ 2593-72), применение вероятностного метода может быть оправдано.

Различные испытательные импульсы, обладающие различными спектрами, по-разному воздействуют на рецепторы ЦТС. Однако суммарное воздействие всех гармонических составляющих спектра одинаково, если собой наступает с заданной, равной для всех испытательных импульсов, вероятностью.

В этом случае целесообразно предположить, что несмотря на очевидное различие энергий пороговых испытательных импульсов, одинаковое воздействие на ЦТС достигается за счет равенства "переключающих энергий" помех - параметров N , учитывающих восприимчивость аппаратуры к воздействию различных гармонических составляющих помех и распределение энергий импульсов в диапазоне $f_1 \div f_n$. Энергия импульса помехи распределена по частотам пропорционально амплитуде спектральных составляющих этого импульса. Чем шире рассматриваемый диапазон частот спектра Δf , чем больше амплитуда его составляющих $S(f_i)$ и выше восприимчивость ЦТС к воздействию гармонического сигнала, тем большая доля переключающей энергии приходится на эти частоты. Поэтому предполагается, что

$$N = S(f_1)F(f_1)\Delta f_1 + S(f_2)F(f_2)\Delta f_2 + \dots + S(f_n)\Delta f_n F(f_n) \quad (9)$$

Поскольку в уравнении (9) n неизвестных $F(f_i)$ для определения их значений необходимо составить и решить систему из n уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n S_1(f_i) \Delta f_i F(f_i) = N, \\ \sum_{i=1}^n S_j(f_i) \Delta f_i F(f_i) = N, \\ \sum_{i=1}^n S_n(f_i) \Delta f_i F(f_i) = N. \end{cases} \quad (10)$$

Полученные в результате решения системы (10) значения $F(f)$ и численное значение переключающей энергии N могут быть использованы в качестве показателя уровня ПЗ микроэлектронных устройств. В этом случае параметр N - допустимая переключающая энергия помехи ($N_{\text{доп}}$), воздействие которой на ЦТС вызывает его сбой с вероятностью $P \leq P_{\text{норм}}$.

В диссертации разработаны методы получения исходных данных для составления и решения систем уравнений вида (8) и (10).

При оценке вероятности устойчивой работы ЦТС в случае воздействия помех с заданными параметрами необходимо определить в соответствии с (9) переключающую энергию помехи ($N_{\text{п}}$) и сравнить с допустимой. Если в результате решения уравнения (9) оказывается, что переключающая энергия помехи меньше $N_{\text{доп}}$, можно считать, что ЦТС будет функционировать устойчиво: вероятность сбоя окажется меньше $P_{\text{норм}}$.

В случае, если $N_{\text{п}} > N_{\text{доп}}$, для обеспечения требуемой ПЗ ЦТС должно быть снабжено помехоподавляющим фильтром. Требуемая эффективность помехоподавления рассчитывается исходя из следующих соображений: ППФ должен обеспечить такое уменьшение амплитуд гармонических составляющих помех в диапазоне частот $f_1 + f_{\text{мах}}$, чтобы при воздействии на вход фильтра помех с заданными параметрами ($N_{\text{п}}$) переключающая энергия помех на его выходе ($N_{\text{пв}}$) оказалась меньше допустимой ($N_{\text{доп}}$). Требования к ППФ таким образом могут быть представлены в виде зависимости $A(f)$ - вносимого затухания в диапазоне частот $f_1 + f_{\text{нох}}$.

Однако сказанное имеет место лишь тогда, когда известны параметры (спектральные плотности) помех, от воздействия кото-

рых необходимо защищаться. Действующие в настоящее время нормы на восприимчивость к помехам недостаточно научно и практически обоснованы, поэтому не могут быть использованы для этой цели. Спектральное же представление информации о ПЗ, а также электромагнитной обстановке на объектах эксплуатации ЦТС в принципе позволяет решить проблему нормирования.

В результате измерения значений спектральных плотностей помех на частотах $f_1 + f_n$ в течение времени $T_{\text{изм}}$ необходимо определить плотность распределения амплитуд гармонических составляющих помех на каждой из частот

$$p = \varphi(A) \quad (II)$$

Математические ожидания амплитуд

$$MA_i = \int_{-\infty}^{\infty} A \varphi(A) dA \quad (I2)$$

Множество значений MA_i может служить отправной точкой при разработке норм на ПЗ, так как совокупность $MA_i = MA(f_i)$ является характеристикой ЭМО.

Если плотности распределения амплитуд гармонических составляющих помех на частотах $f_1 \dots f_n$ описываются функциями $\varphi_1(A), \varphi_2(A), \dots, \varphi_n(A)$, функция $MA(f_i)$ указывает положение "центров тяжести" распределений $\varphi_i(A)$ (рис. I).

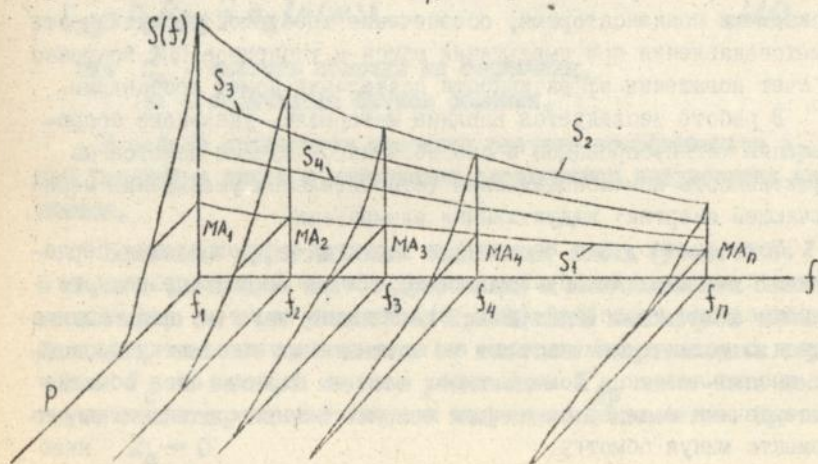


Рис. I

Тогда кривую S_4 предлагается считать спектральной плотностью "усредненной" гипотетической помехи, от воздействия которой необходимо защищаться.

Максимальные значения амплитуд гармонических составляющих на частотах $f_1 + f_n$ образуют спектр "наиболее жесткого импульса" помехи (кривая S_2). В зависимости от функционального назначения разрабатываемого ЦТС, цены боев для определенных классов микроселектронных устройств нормы на ПЗ могут быть заданы в виде спектральных плотностей $S_1, S_2, S_3, S_4 \dots$. Синтез импульсных помех по известным спектрам позволит проводить оперативные контрольные испытания создаваемых микроселектронных устройств.

Предложенный подход к разработке норм на ПЗ является более предпочтительным по сравнению с известным, так как учитывает реальную ЭМО на объектах эксплуатации ЦТС.

Третья глава диссертации посвящена исследованию и разработке помехоподавляющих средств.

Эффективность подавления помех наиболее широко использующимися для этих целей пассивными фильтрами во многом зависит от конструкции и способов изготовления входящих в их состав элементов — конденсаторов и катушек индуктивности. Так как при разработке ППФ приходится пользоваться типовыми, серийно выпускаемыми конденсаторами, обеспечение требуемой эффективности помехоподавления при уменьшении массы и габаритов ППФ возможно за счет повышения эффективности подавления помех дросселями.

В работе исследуется влияние материала, удельного сопротивления магнитопроводов и способов изготовления обмоток на эффективность помехоподавления (относительное уменьшение переключающей энергии) индуктивными элементами.

Установлено, что величина и характер сопротивления сердечников существенным образом сказывается на характере полного сопротивления дросселей (рис. 2). Вызвано это тем, что магнитопровод с увеличением частоты сигнала шунтирует обмотку дросселя: высокочастотные помехи через емкость первого слоя обмотки на сердечник и через сердечник поступают на выход индуктивного элемента минуя обмотку.

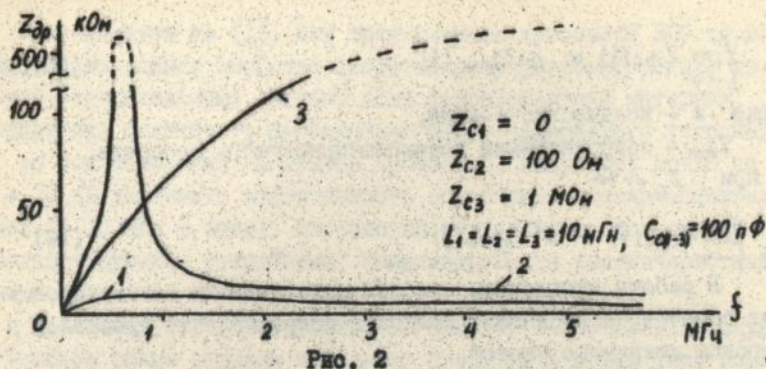


Рис. 2

Сопротивление дросселя с однослойной обмоткой на высокой частоте

$$\lim_{f \rightarrow \infty} Z_{\text{др}}(f) = Z_c, \quad (\text{I3})$$

где Z_c — сопротивление сердечника.

В результате проведенных исследований установлено, что известные формулы для расчета приведенной ко входным зажимам емкости первого слоя обмотки на сердечник обладают низкой точностью и не могут быть использованы при расчете сопротивлений дросселей ШФ. Для определения численного значения $C_{\text{пр}}$ целесообразно воспользоваться предложенной зависимостью

$$C_{\text{пр}} = C_c / (a_1 + a_2 \ln(w)) \quad (\text{I4})$$

где C_c — емкость обмотки на сердечник,
 w — количество витков обмотки.

В работе приводится методика расчета коэффициентов a_1, a_2 для различных типов и материалов сердечников индуктивных элементов.

Повышение эффективности подавления помех (увеличение $Z_{\text{др}}$) в широком диапазоне частот дросселями с многослойными обмотками возможно за счет уменьшения приведенной межслоевой емкости. Доказано, что вне зависимости от величины сопротивления сердечника Z_c на высокой частоте увеличение $Z_{\text{др}}$ может быть достигнуто секционированием обмоток индуктивных элементов. Причем, если $Z_c \rightarrow 0$

$$\lim_{f \rightarrow \infty} Z_{дрс}(f) = k \cdot Z_{дрнс}(f), \quad (15)$$

где k — количество секций,

$Z_{дрнс}$ — сопротивление несекционированного дросселя,
а при $Z_0 \rightarrow \infty$

$$\lim_{f \rightarrow \infty} Z_{дрс}(f) = k^2 Z_{дрнс}(f). \quad (16)$$

В работе предложены способы изготовления секционированных обмоток, позволяющие повысить сопротивление дросселей в широком диапазоне частот.

Полученные теоретические результаты подтверждены результатами экспериментов. Проведенный полный факторный эксперимент (2^4) позволил определить весовые коэффициенты при факторах (секционирование обмоток, способ изготовления обмоток, тип (сечение) и удельное сопротивление сердечников) влияющих на эффективность подавления помех на частотах 1 + 10 МГц.

Исследованиями установлено, что ферромагнитные материалы (ферриты и магнитодиэлектрики) способны существенно изменять свое сопротивление при изменении частоты сигнала и температуры материала. Причем с увеличением f и t° сопротивление указанных ферромагнетиков (Z_F) уменьшается, что ведет к ухудшению помехоподавляющих свойств дросселей с сердечниками из ферритов (13). Для учета влияния t° и f на величину сопротивления дросселей предлагается воспользоваться формулами:

$$Z_F(f) = Z_{F(нy)} \cdot \Psi^*(f), \quad (17)$$

$$Z_F(t) = Z_{F(нy)} \cdot \psi(t^\circ), \quad (18)$$

где $Z_{F(нy)}$ — сопротивление ферромагнетиков в нормальных условиях (при $f = 0$ и $t^\circ = 20^\circ \text{C}$),

$\Psi^*(f)$ — функция, выражающая качественную зависимость сопротивления определенного типа феррита или магнито-диэлектрика от частоты,

$\psi(t^\circ)$ — то же, от температуры.

В работе приведена методика получения исходных данных и расчета функций $\Psi^*(f)$ и $\psi(t^\circ)$.

Как следует из (13) для традиционных дросселей ПШФ термочастотозависимые свойства сопротивления ферромагнетиков являются отрицательными. Однако если ферромагнитный материал (сердечник) подключить параллельно входу защищаемого устройства, то без изменения габаритов дросселей, например, можно на $30 + 35$ дБ увеличить эффективность ослабления высокочастотных помех (5–10 МГц и выше). Ферритовый сердечник в этом случае выполняет функции устройства, канализирующего высокочастотный сигнал.

Исследование частотозависимых свойств сопротивлений ферромагнетиков таким образом позволило предложить новые типы помехоподавляющих фильтров – ПШФ на основе ферристоров.

В диссертации разработана методика расчета требуемых параметров ферристоров для обеспечения максимальной эффективности подавления помех подобными фильтрами.

В четвертой главе представлены результаты практического использования разработанных методов и средств.

Определен уровень ПЗ и восприимчивость к воздействию гармонических составляющих спектра импульсных помех электромагнитного поля вероятностным и энергетическим методами. Реле, в качестве одного из испытываемых устройств выбрано потому, что для него известен диапазон и относительные значения восприимчивости к гармоническим сигналам. Сравнение результатов расчета с имеющейся информацией, а также с данными экспериментальных исследований показало, что относительная приведенная погрешность расчета значения переключающей энергии ($N_{\partial on} = 8.36$) различными методами не превысила 5%, а значений $F(f_i)$ на частотах $0 + 1$ кГц – 20%. Установлено, что размерность матриц систем уравнений (8) и (10) в большей степени сказывается на точности расчета восприимчивости устройств к воздействию гармонических помех ($F(f_i)$) и в меньшей степени – на точности расчета $N_{\partial on}$.

На основании разработанных методик определен уровень ПЗ ($N_{\partial on} = 0.285$) и восприимчивость к гармоническим помехам одного из наиболее широко распространенных элементов схем ПТС – D-триггера, а затем рассчитаны параметры помехоподавляющего RC-фильтра для защиты входной цепи триггера от помех с заданными параметрами. Испытание устройства, снабженного ПШФ, показало,

что RC-фильтр, рассчитанный для подавления импульсных помех с $U = 7$ В и $\tau = 10$ мкс обеспечивает устойчивую работу триггера при воздействии более "жесткой" помехи - фактическая эффективность помехоподавления оказалась на 25 % выше расчетной.

Определены значения восприимчивости $F(f)$ к воздействию гармонических составляющих импульсных помех, а также уровень ПЗ управляющих ЭВМ системы внутривреакторного контроля (СВРК) Запорожской АЭС ($N_{\text{доп}} = 70.5$). Результаты расчета $F(f)$ использованы при разработке сетевых помехоподавляющих фильтров для СВРК, локальных систем передачи и обработки данных МикроДАТ, оптимизации параметров дросселей ППФ, разработке рекомендаций по повышению ПЗ аналогичных ЦТС.

Получены расчетные выражения для определения сопротивлений ферромагнитных материалов, используемых в качестве сердечников традиционных индуктивных элементов ППФ, а также магнитопроводов ППФ на базе ферристоров: ферритов марок 1000 НН, М 2000 НН, ВН-150, 3000 НМС и альсифера ТЧ-60 в диапазоне частот $0 + 40$ МГц и температур $- 0 + 100^{\circ}$ С. Приведены примеры расчета ферристорных ППФ. С использованием методов теории планирования эксперимента получено уравнение регрессии, позволяющее рассчитать относительное изменение сопротивления ферритовых образцов (феррит М 2000 НН) при произвольном одновременном изменении частоты сигнала (X_1 , $0 + 2$ МГц) и температуры ферристора (X_2 , $20^{\circ} + 80^{\circ}$ С)

$$Y = 0.411 - 0.307 X_1 - 0.144 X_2 + 0.135 X_1 X_2 \quad (19)$$

Проведенные исследования эффективности подавления помех фильтрами на основе ферристоров позволили определить оптимальные конструкции ППФ. Установлено, что лучшими помехоподавляющими свойствами ($35 + 45$ дБ на частотах $5 + 50$ МГц), массогабаритными показателями (не более 1-ваттного резистора) и технологичностью изготовления обладают индуктивно-ферристорные фильтры на сердечниках гантельного типа. Использование подобных ППФ для подавления помех из цепей передачи информации позволяет существенно повысить уровень ПЗ ЦТС.

Испытания и опытная эксплуатация разработанных сетевых и индуктивно-ферристорных ШФ показала их высокую эффективность и надежность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Известные методы определения ПЗ цифровых микроэлектронных устройств не позволяют достоверно определять восприимчивость ЦТС к внешним импульсным помехам и их гармоническим составляющим из-за несовершенства методов испытаний и норм на ПЗ. Представление информации об уровне ПЗ в виде амплитуд и длительностей импульсов помех затрудняют разработку требований к ШФ на основе результатов испытаний.

2. Разработаны вероятностный и энергетический методы, позволяющие определять ПЗ ЦТС и восприимчивость микроэлектронных устройств к гармоническим сигналам.

3. Предложенные методы позволяют определять требуемую эффективность подавления помех ШФ и использовать известные методы синтеза фильтров при разработке ШФ.

4. Вероятностный и энергетический методы определения ПЗ ЦТС позволяют повысить достоверность результатов испытаний на ПЗ и значительно облегчить их использование.

5. Предложена методика обоснования норм на ПЗ, а также расчета параметров помех для контрольных испытаний ЦТС.

6. Защита цифровых микроэлектронных устройств от помех из сети питания и каналов передачи данных может быть обеспечена пассивными помехоподавляющими фильтрами. Эффективность подавления помех ШФ в первую очередь зависит от качества входящих в их состав индуктивных элементов.

7. Повышение эффективности подавления помех и расширение диапазона подавляемых частот дросселями ШФ может быть достигнуто в результате выполнения комплекса мероприятий, направленных на уменьшение собственной емкости обмотки, а также использования магнитопроводов с высоким удельным сопротивлением.

8. Феррокерамические сердечники индуктивных элементов обладают нелинейной зависимостью сопротивления от частоты. Для

традиционных дросселей ППФ свойство ферритов и магнитодиэлектриков уменьшать свое сопротивление высокочастотным сигналам является отрицательным, так как в итоге ведет к уменьшению их полного сопротивления и снижению эффективности помехоподавления.

9. Частотозависимые свойства проводимости ферритов предлагается использовать для повышения эффективности подавления помех фильтрами на основе ферристоров.

10. Опытная эксплуатация помехоподавляющих средств, разработанных в соответствии с предложенными методами показала их высокую эффективность и надежность, подтвердив правильность основных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертационной работе.

11. Использование результатов диссертации позволило уменьшить количество сбоев и отказов аппаратуры системы внутриреакторного контроля Запорожской АЭС, локальных систем передачи и обработки данных на базе комплексов МикроДАТ, аппаратуры локомотивной системы безопасности и др., повысить их эксплуатационную надежность.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Ковалев А.А., Кустов В.Ф., Нейчев О.В. Результаты исследования внешних помех и восприимчивости к ним аппаратуры внутриреакторного контроля // Материалы Всесоюзной научно-технической конференции "Помехи в цифровой технике - 90". (Каунас, 1990). - Вильнюс, 1990. - С. 18-21.

2. Костроминов А.М., Кустов В.Ф., Нейчев О.В. К вопросу о выборе параметров моделируемых помех при испытаниях цифровых технических средств // Материалы Всесоюзной научно-технической конференции "Помехи в цифровой технике - 90". (Каунас, 1990). - Вильнюс, 1990. - С. 21-23.

3. Кустов В.Ф., Нейчев О.В. Повышение устойчивости микропроцессорных систем к воздействию электромагнитных помех // Межвуз. сб. науч. тр. / 1990, ХИИТ, Вып. 14. - С. 58-61.

4. Кустов В.Ф., Нейчев О.В. Исследование эффективности средств защиты от помех микроэлектронной аппаратуры // Тез.

докл. науч.-техн. конфер. (Хабаровск, 1989).- Хабаровск, 1989.- С. 33.

5. Кустов В.Ф., Нейчев О.В. Пути обеспечения электромагнитной совместимости технических средств МикроДАТ// Тез. докл. науч.-техн. конфер. "Комплекс микропроцессорных средств диспетчеризации МикроДАТ. Перспективы развития и применения в АСУТП" .- Харьков, 1991.- С. 68-71.

6. Кустов В.Ф., Нейчев О.В. Помехоподавляющие фильтры на базе ферромагнитных и композиционных материалов// Тез. докл. республ. науч.-техн. конфер. "Микропроцессорные системы связи и управления на ж.д. транспорте".- (Алушта, 1991).- Киев, 1991.- С. 34-35.

7. Кустов В.Ф., Нейчев О.В., Пелих Л.Н. Использование композиционных фильтров для обеспечения электромагнитной совместимости технических средств МикроДАТ с внешней средой по нормам Регистра СССР// Судостроительная промышленность. Сер. Автоматика и телемеханика.- 1991.- Вып. 13.- С. 32-33.

8. Костромин А.М., Кустов В.Ф., Нейчев О.В. Метод и аппаратные средства для адекватных испытаний цифровых объектов на помехозащищенность// Вопросы радиоэлектроники. Сер. Электронная вычислительная техника.- 1991.- Вып. 7,- С. 121-126.

9. Кустов В.Ф., Нейчев О.В., Родин Г.Д. Помехоподавляющие фильтры на основе ферромагнитных резисторов// Тез. докл. второй науч.-техн. конфер. "Электромагнитная совместимость технических средств".- Санкт-Петербург, 1992.- С. 110-111.

10. Кустов В.Ф., Нейчев О.В. Метод определения помехозащищенности микроэлектронной аппаратуры// Тез. докл. второй науч.-техн. конфер. "Электромагнитная совместимость технических средств".- Санкт-Петербург, 1992.- С. 83-86.

11. Кустов В.Ф., Нейчев О.В. Разработка и исследование композиционных помехоподавляющих средств// Республиканская школа - семинар "Микропроцессорные системы связи и управления на ж.д. транспорте".- (Алушта, 1992).- Киев, 1992.- С. 21-23.

12. А.С. 1683080. МКИ Н01 F 19/04, Н04 В 15/00 Устройство подавления помех / Кустов В.Ф., Нейчев О.В., Родин Г.Д. /СССР/. № 4750158: Заявлено 16.10.89.: Опубл. БИ № 37.91

13. А.С. 1756953. МКИ Н01 Г 19/04 Устройство подавления помех / Кустов В.Ф., Нейчев О.В., Родин Г.Д., Золочевский П.П. /СССР/. № 4826945; Заявлено 21.05.90.; Оpubл. БИ №31.92.

14. А.С. 1756193 МКИ В61 25/06 Индуктивный датчик для автоматической локомотивной сигнализации / Жох В.П., Кустов В.Ф., Удовиков А.А., Нейчев О.В./СССР/. № 4722914; Заявлено 24.05.89.; Оpubл. БИ № 31. 92.

Не

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

УДК 621.391

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ
ЦИФРОВЫХ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

НЕЙЧЕВ Олег Владимирович

Ответственный за выпуск ГОРБУШКО А.И.

Подписано к печати 3/IV-1993

Формат бумаги 80x84 1/16 . Усл. печ. л. I .

Тираж 100 экз. Заказ № 345

Тип. ХИИТа, 310050, г. Харьков-50, пл. Фейербаха, 7.

AB 27.624

AB 27.624