

На правах рукописи



ОБХОДСКИЙ Артем Викторович

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОГО ТОКАМАКА КТМ

Специальность: 05.13.06 - автоматизация и управление технологическими процес-
сами и производствами (атомная промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2010

Работа выполнена на кафедре электроники и автоматики физических установок «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент
Павлов Вадим Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Муравьев Сергей Васильевич

доктор технических наук,
профессор
Калайда Владимир Тимофеевич

Ведущая организация:

Институт физики токамаков Российского научного центра “Курчатовский институт” г. Москва.

Защита состоится 13 декабря 2010 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДС 212.025.03 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 2, 332 ауд., (корп. 10).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан 12 ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета по
защите докторских и кандидатских
диссертаций ДС 212.025.03, доктор
химических наук, профессор

 И.И. Жерин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Экспериментальные исследования, проводимые на физических установках типа токамак, нацелены на изучение способов создания и механизмов длительного, стабильного поддержания реакции термоядерного синтеза.

Качество экспериментов, проводимых на токамаках, во многом зависит от эффективности измерительных систем (ИС), участвующих в процессе управления параметрами исследуемого объекта (высокотемпературной плазмы) и обеспечивающих сохранение экспериментальной информации.

При создании информационно-измерительного комплекса установки токамак особое внимание уделяется системе измерения электромагнитных параметров (СИЭП). Информация, поступающая от СИЭП, используется одновременно для управления формой, положением, током, энергосодержанием и другими параметрами плазмы в реальном масштабе времени.

Токамаки являются уникальными установками, поскольку предназначены для решения определенного круга исследовательских задач. Эксперименты на токамаках могут отличаться достигаемыми предельными параметрами плазмы, характеристиками магнитного поля для удержания плазмы, режимами управления параметрами плазмы, характеристиками измерительных систем и набором применяемых методов диагностирования параметров плазмы. Данные особенности приводят к трудностям проектирования и реализации СИЭП, как единого универсального решения для установок токамак [2].

Актуальность вопросов, рассматриваемых в диссертации, обусловлена необходимостью разработки нового метода построения СИЭП, обеспечивающего оптимальные технико-экономические показатели качества измерительной системы и эффективность управления параметрами плазмы на модернизируемых, а также на вновь создаваемых физических установках и на “Казахстанском материаловедческом токамаке – КТМ” в частности.

Цель диссертационной работы состоит в исследовании и проектировании системы измерения сигналов с датчиков индукционного типа, обеспечивающей достоверность результатов измерений в условиях сильных помех, сохранение результатов измерений в течение разряда плазмы и выполняющей функций передачи данных смежным системам для управления параметрами плазмы в реальном масштабе времени.

Поставленная цель достигается решением следующих **задач**:

1. Исследование принципов построения СИЭП действующих установок токамак. Анализ используемых общесистемных структур и применяемых программно-аппаратных средств.

Подписано к печати 08.11.2010. Формат 60x84/16. Бумага «Классика».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 1,22. Уч.-изд.л. 1,10.

Заказ 1863-10. Тираж 70 экз.

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

2. Синтез оптимальной обобщенной структуры СИЭП.
3. Разработка модели системы измерения электромагнитных параметров установки токамак КТМ. Исследование характеристик и анализ требований к функциям и характеристикам системы.
4. Разработка алгоритмов сбора, первичной обработки, передачи и регистрации измерительной информации, обеспечивающих функционирование СИЭП в реальном масштабе времени с заданными показателями качества.
5. Разработка алгоритма автоматической настройки и тестирования измерительных каналов и каналов передачи данных СИЭП.
6. Выбор из числа стандартных и разработка нестандартных программно-аппаратных средств для построения СИЭП.
7. Проведение комплексных экспериментальных испытаний СИЭП и анализ ее эффективности.

Научная новизна. Основные научные достижения диссертации следующие:

1. Впервые для построения СИЭП токамака использована иерархическая структура с разветвленными связями, реализуемая с помощью радиальных волоконно-оптических линий связи и обеспечивающая разделение информационных сигналов в цифровом виде во вторичных преобразователях с целью их одновременной передачи нескольким внешним адресатам.
2. Разработана имитационная модель распределенной измерительной системы для апробации алгоритмов первичной обработки сигналов и передачи измерительной информации, с помощью которой были определены оптимальные функции и характеристики технических и программных средств системы.
3. Адаптирован к условиям реального времени алгоритм цифровой частотной коррекции, используемый для расширения полосы пропускания датчиков индукционного типа с отличающимися электрическими параметрами;
4. Модифицирован алгоритм численного интегрирования методом Гаусса по 5 отсчетам для случая применения на установках токамак, при наличии внешних помех и условия равномерного шага дискретизации сигналов.
5. Разработан новый метод асинхронной передачи измерительной информации, позволяющий передавать кодовые последовательности неограниченной длины с минимальной информационной избыточностью без потери синхронизации.

Практическая ценность и реализация работы.

1. На кафедре электроники и автоматики физических установок НИ ТПУ, в учебный процесс внедрен лабораторный стенд «Система многоканальной диагностики быстропротекающих процессов» для подготовки магистрантов по специальности «Автоматизация научных исследований, испытаний и эксперимента».

9. Трубочев А.А., Обходский А.В. Разработка и реализация на программном языке Си алгоритма цифрового интегрирования сигналов с датчиков электромагнитной диагностики установки токамак КТМ // Современная техника и технологии: труды XV Международной научно-практ. конф. молодых ученых. - Томск. 2009. – Т. 2. - С.303-304.

10. Система управления плазмой: Учебное пособие / В.М. Павлов, А.В. Обходский, Ю.Н. Голобоков, А. В. Овчинников. – М.: Изд. ТПУ, 2008 – 160 с.

11. Obkhodskii A.V., Pavlov V.M., Baystrukov K.I., Golobokov Y.N., Merkulov S.V. Data acquisition system for KTM magnetic diagnostic // 19th IAEA Technical Meeting on “Research using Small Fusion Devices: conference proceedings. Kurchatov, Kazakhstan. 2009. -P. 37.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Драпико Е.А., Павлов В.М., Обходский А.В., Байструков К.И., Шарнин А.В., Кудрявцев В.А., Герасименко Е.А., Федотов Е.В., Михалев С.В. Разработка специальных алгоритмов реконструкции физических полей для термоядерной установки – ТОКАМАКА КТМ // Известия вузов Физика. – 2004. – Т.47. - № 11. - С.168-172.
2. Драпико Е.А., Байструков К.И., Обходский А.В., Павлов В.М., Шарнин А.В. Развитие техники измерений электромагнитных параметров в ТОКАМАКЕ КТМ // Экспериментальные возможности токамака КТМ и программа исследований: труды Международного научно-практ. семинара.- Астана-Курчатов. - 2005. - С.102-105.
3. Обходский А.В., Байструков К.И., Меркулов С.В. Система измерения электромагнитных параметров для электрофизической установки типа ТОКАМАК //Современные техника и технологии: труды XII Международной научно-практ. конф. молодых ученых - Томск: ТПУ, 2006 - т. 2. - С.98-100.
4. Обходский А.В., Байструков К.И., Меркулов С.В. Реализация каналов цифровой связи для системы электромагнитной диагностики (СЭМД) ТОКАМАКА КТМ //Современные техника и технологии: труды XIII Международной научно-практ. конф. молодых ученых - Томск: ТПУ, 2007 - т. 2. - С. 404-406.
5. Bastrukov K.I., Pavlov V.M., Sharnin A.V., Obkhodskii A.V., Merkulov S.V., Golobokov Y.N., Mezentsev A.A., Ovchinnikov A.V., Control And Data Acquisition System Of Tokamak KTM // Plasma and Fusion science: AIP Conference proceedings. - Лиссабон, Португалия, 2007. Vol. 996. - P. 297-306.
6. Павлов В.М., Байструков К.И., Обходский А.В., Голобоков Ю.Н., Драпико Е.А., Алейник А.Н., Разработка проектных решений по созданию системы управления плазмой термоядерной установки токамак КТМ // Отчет о НИР. 2005. Регистрация в ВНИИЦ, - Рег.№ 01200501724. Инв.№ 0220.0.704957.
7. Обходский А.В., Байструков К.И., Павлов В.М., Меркулов С.В., Голобоков Ю.Н. Система измерения электромагнитных параметров для электрофизической установки токамак КТМ // Приборы и техника эксперимента. – 2008. - №6. – С. 23-28.
8. Обходский А.В., Меркулов С.В., Байструков К.И. Применение метода динамической коррекции информационных сигналов с датчиков электромагнитной диагностики для повышения качества управления параметрами плазмы на физических установках типа ТОКАМАК // Современная техника и технологии: труды XV Международной научно-практ. конф. молодых ученых – Томск: ТПУ, 2009. - Т.2. - С.264-266.

2. Результаты проведенных исследований были реализованы на практике и применены при разработке многоканальной системы измерения электромагнитных параметров, внедренной в составе системы автоматизации экспериментов (САЭ) физической установки токамак КТМ.

Реализация результатов диссертационной работы подтверждена актами о внедрении и протоколом экспериментальных испытаний СИЭП.

Положения, представляемые к защите.

1. Структура СИЭП, обеспечивающая высокую скорость передачи измерительной информации одновременно нескольким внешним системам в реальном масштабе времени и сохранение данных без потерь при длительности разрядов плазмы более 5 с.
2. Алгоритм цифровой частотной коррекции сигналов с датчиков индукционного типа, позволяющий измерять быстроменяющиеся параметры магнитного поля с высокой точностью в широком частотном диапазоне.
3. Результаты исследования эффективности численных методов интегрирования для решения задач восстановления параметров магнитного поля измеряемых с помощью индукционных первичных преобразователей.
4. Аппаратная реализация каналов передачи данных на базе программируемых логических матриц для управления быстропротекающими процессами в реальном масштабе времени.
5. Методы и результаты экспериментальных испытаний измерительных каналов и каналов передачи данных распределенной системы измерения электромагнитных параметров установки токамак.

Апробация работы. Основные результаты диссертации представлялись и обсуждались на: Международном семинаре «Экспериментальные возможности токамака КТМ и программа исследований» (г. Астана, 2005 г.), Международных научно-практических конференциях «17th, 18th, 19th IAEA Technical Meeting on Research Using Small Fusion Devices» (г. Лиссабон, Португалия, 2007 г., г. Алушта, Украина, 2008 г., г. Курчатов, Республика Казахстан, 2009г.), XII, XIII, XIV и XV Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2006 - 2009 г.г.), Международных совещаниях рабочих групп по созданию термоядерной установки токамак КТМ (г. Семипалатинск, 2005 г., г. Курчатов, 2008 г.), Международном научно-техническом совещании «Automated control systems of tokamak plants» (г. Фраскати, Италия, 2008 г.), а также на научных семинарах кафедры электроники и автоматики физических установок Томского политехнического университета (г. Томск, 2005-2010 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 24 научные работы, включая 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 17 тезисов докладов на на-

учно-практических конференциях, 4 научно-технических отчета с регистрацией в ВНИИЦ и 1 учебное пособие.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 168 страниц, включая 62 рисунка, 17 таблиц, список литературы из 156 наименований и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, изложены цели и задачи, решаемые в диссертации, показана научная новизна, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Данная глава посвящена анализу исходных данных и постановке задач исследований. Особое внимание уделяется анализу функций и режимов работы СИЭП токамака КТМ. В первой главе также проведены исследования характеристик выходных сигналов датчиков электромагнитной диагностики и сформулированы требования к функциям и характеристикам СИЭП. Приведены результаты анализа существующих решений для построения измерительных систем действующих токамаков и результаты разработки обобщенной структуры СИЭП токамака КТМ.

Система автоматизации экспериментов токамака по количеству реализуемых функций управления и контроля технологических параметров, составу и технологичности используемой аппаратуры является сложным программно-техническим комплексом. Поиск неисправностей функционирования и настройка такого многоканального комплекса на заданные параметры разряда оператором представляет собой трудоемкий и медленный процесс, при этом человеческий фактор в данном процессе играет отрицательную роль. Ввиду данной особенности измерительная система должна функционировать в автоматическом режиме. Блок-схема общего алгоритма функционирования СИЭП представлена на рис 1.1 [1, 3].

Для сравнительной оценки эффективности возможных методов реализации структуры СИЭП в диссертации предлагается использовать обобщенный информационный критерий качества

$$W_u = \frac{C_{ch} T}{\log_2 V_0 / V^*} \quad (1.1)$$

где, C_{ch} - стоимость измерительной системы, $\log_2 V_0 / V^*$ - минимальное количество информации необходимое для представления сигнала с уровнем V_0 с погрешностью V^* , T - минимальное время формирования и обработки информации.

В результате испытаний СИЭП были подтверждены технические характеристики измерительной системы в частности: приведенная погрешность измерения потока магнитного поля во $\gamma_{прив}$ составила менее 1%, максимальная длительность эксперимента с сохранением данных, получаемых за время разряда плазмы, в полном объеме составило 10 с, объем данных сохраняемых за время эксперимента с учетом функционирования 160 измерительных каналов составил 3.125 Гбайт, время передачи всего объема экспериментальных данных после завершения измерений во внешний сервер составило 135с [7].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Применение метода цифровой частотной коррекции для обработки сигналов с датчиков индукционного типа позволяет повысить точность измерений в среднем на 0.8 % и унифицировать схемотехнические решения для построения измерительных каналов СИЭП. Для обеспечения погрешности измерений $< 1 \%$ в условиях помех $S / N \in [-60 : 8]$ Дб, частота дискретизации сигналов должна превышать частоту максимальной гармоники полезного сигнала в 10 раз.

2. Метод численного интегрирования Гаусса по 5 обеспечивает большую точность по сравнению с методами трапеции и Симпсона в условиях внешних помех $S / N \in [-60 : +8]$ Дб при равномерном шаге дискретизации сигналов с датчиков электромагнитной диагностики. Другим преимуществом метода Гаусса по сравнению с методами трапеции и Симпсона является его быстрое действие, которое определяется количеством операций сложения и умножения для вычисления значения интеграла на элементарном участке из пяти дискретных отсчетов.

3. Применение иерархической структуры с разветвленными связями для построения СИЭП токамака КТМ позволяет одновременно решать задачи управления параметрами плазмы в реальном масштабе времени и сохранять данные в необработанном виде. Допустимое время измерения параметров магнитного поля по 160 измерительным каналам с частотой дискретизации сигналов 1 МГц составляет 10 с. Объем данных, накапливаемых за время эксперимента, составляет 3.125 Гбайт.

4. Ресурсные испытания СИЭП с периодической проверкой работоспособности показали ее высокую надежность. При проведении испытаний в течение 72 часов сбоя в программном обеспечении и неисправностей в оборудовании зафиксировано не было. Экспериментальные испытания СИЭП проводились в автоматическом режиме, между запусками измерений выдерживалась 20 минутная пауза (штатный режим функционирования КТМ).

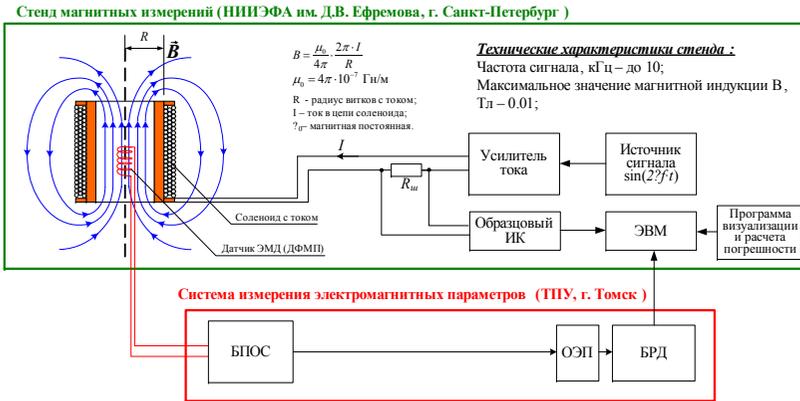


Рис. 4.1. Структурная схема стенда испытаний СИЭП

лась по формуле (2.8). При проведении экспериментов изменяемым параметром являлась частота синусоидального тока $f \in [0.3 : 10]$ кГц в соленоиде. Эксперименты проводились для тангенциальной и нормальной составляющей двухкомпонентного зонда и эталонного индукционного датчика с полосой пропускания до 1 МГц.

Результаты испытаний представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Результаты экспериментальных испытаний СИЭП на стенде магнитных измерений.

| Частота синусоидального тока соленоида, кГц | Эталонный индукционный датчик, $\gamma_{прив}, \%$ | Нормальная составляющая ДФМП, $\gamma_{прив}, \%$ | Тангенциальная составляющая ДФМП, $\gamma_{прив}, \%$ |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 0,3 | 0,02 | 0,1 | 0,2 |
| 0,5 | 0,05 | 0,1 | 0,2 |
| 1 | 0,09 | 0,2 | 0,3 |
| 2 | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| 5 | 0,2 | 0,3 | 0,4 |
| 10 | 0,3 | 0,3 | 0,4 |

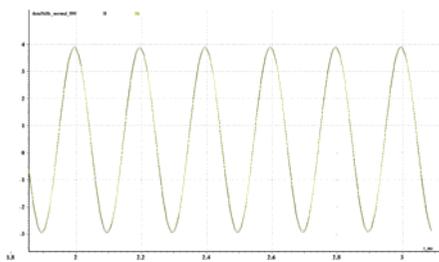


Рис. 4.2. Нормальная составляющая ДФМП ($f = 5 \text{ кГц}$)

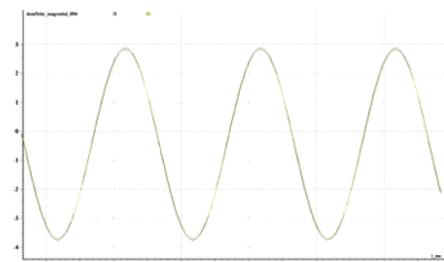


Рис. 4.3. Тангенциальная составляющая ДФМП ($f = 5 \text{ кГц}$)

Обобщенный критерий (1.1) связывает экономические затраты C_{ch} на создание и сопровождение системы со сложностью ее реализации и проектирования, точностью V_0 / V^* и быстродействием T . Данный показатель характеризует экономические затраты на достижение единицы скорости получения информации в измерительной системе и имеет размерность $[\$ \cdot \text{Мбит} / \text{с}]$.

Для измерения потока магнитного поля формируемого плазмой с током применяются датчики индукционного типа. Схема расположения датчиков представлена на рис. 1.2.

Эквивалентная электрическая схема индукционного измерительного преобразователя показана на рис. 1.3. Параметры активного (R) и реактивного (L, C) сопротивлений датчиков отличаются и зависят от конструкции, а также от длины проводных линий связи соединяющих датчик с измерительной аппаратурой СИЭП [1, 8].

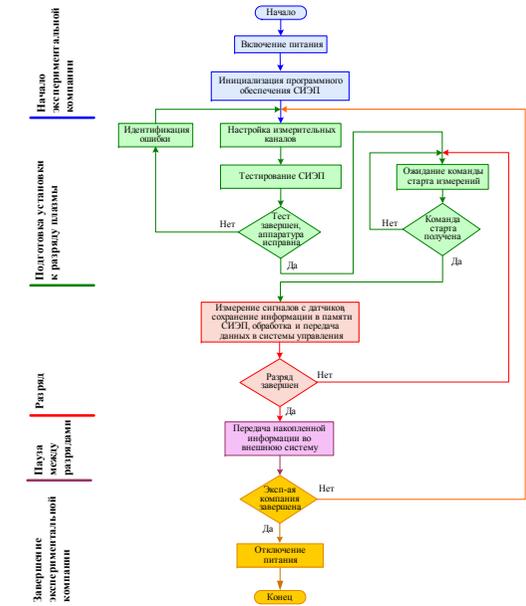


Рис. 1.1. Блок схема алгоритма функционирования СИЭП

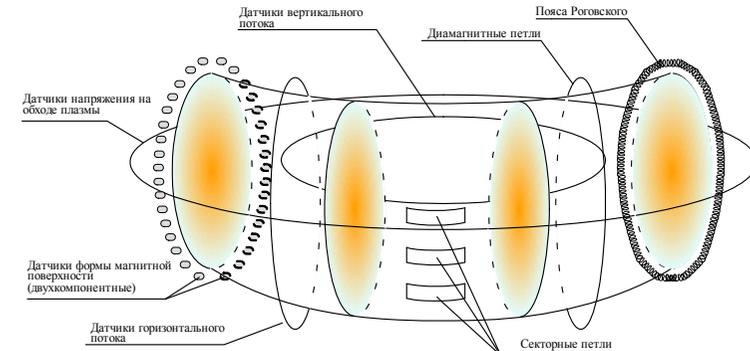


Рис. 1.2. Схема расположения датчиков ЭМД

Динамические свойства индукционного измерительного преобразователя описываются дифференциальным уравнением второго порядка [2, 8]:

$$L \cdot \frac{dI}{dt} + I \cdot R + \frac{1}{C} \int_0^t I \cdot dt = V_{u.n.} \quad (1.2)$$

Передаточная функция датчика:

$$W(s) = \frac{K}{T^2 \cdot s^2 + 2\xi \cdot T \cdot s + 1} \quad (1.3)$$

Амплитудно-частотная характеристика:

$$H(f) = \frac{V_{u.n.}}{E_{u.n.}} = \frac{1/(2\pi \cdot f \cdot C)}{\sqrt{R^2 + (2\pi \cdot f \cdot L + 1/2\pi \cdot f \cdot C)^2}} \quad (1.4)$$

с учетом $w = 2\pi \cdot f$.

На рис. 1.4, 1.5 и 1.6 представлены амплитудно-частотные характеристики датчиков ЭМД при различных значениях параметров R, L и C соответственно.

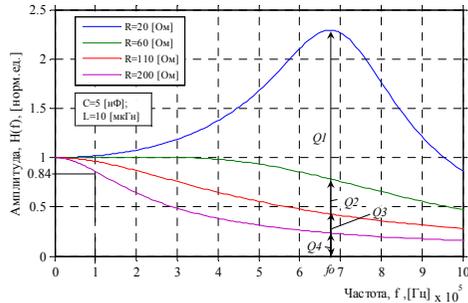


Рис. 1.4. АЧХ датчика ЭМД при различных значениях R.

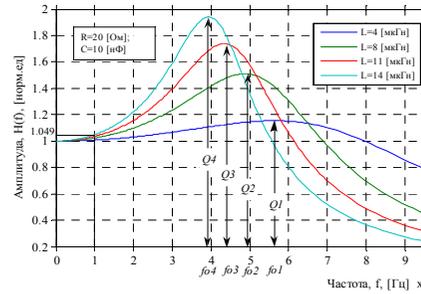


Рис. 1.5. АЧХ датчика ЭМД при различных значениях L.

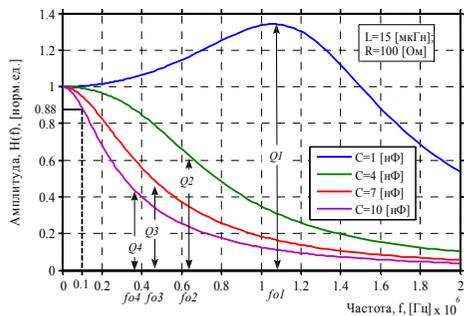


Рис. 1.6. АЧХ датчика ЭМД при различных значениях C.

Для обеспечения погрешности измерения сигналов с датчиков на уровне 1 % и схмотехнической унификации измерительных каналов в диссертационной работе предложено выполнять цифровую частотную коррекцию сигналов с датчиков в диапазоне частот полезного сигнала 0-100 кГц [8].

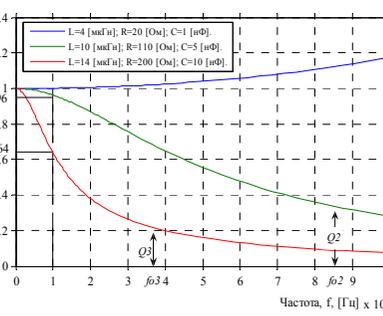


Рис. 1.7. АЧХ датчика ЭМД при граничных значениях R, L и C.

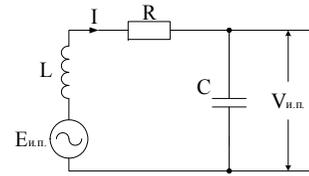


Рис. 1.3. Эквивалентная электрическая схема индукционного измерительного преобразователя

$E_{u.n.}$ – ЭДС, наводимая в цепи; L , R , C – индуктивность, сопротивление и емкость датчика соответственно, $V_{u.n.}$ – уровень напряжения на выходе датчика.

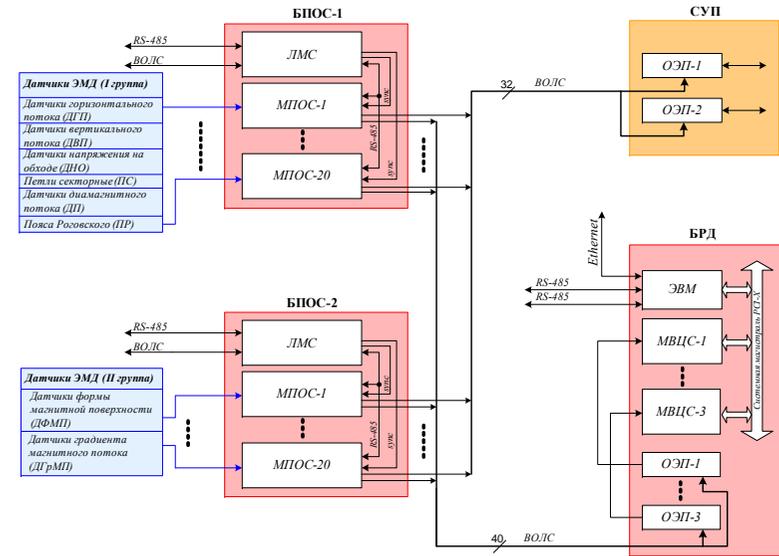


Рис. 3.1. Структура комплекса технических средств СИЭП

БПОС – блок первичной обработки сигналов; ЛМС - локальный модуль синхронизации; ВОЛС - волоконно-оптические линии связи; БРД – блок регистрации данных; СУП – система управления плазмой; ОЭП – оптоэлектрический преобразователь; MVЦС – модуль ввода цифровых сигналов.

Второй уровень измерительной системы представляет собой блок регистрации данных (БРД), в состав которого входят преобразователи интерфейсов – оптоэлектрические преобразователи, модули ввода цифровых сигналов в количестве 3 шт. и ЭВМ регистрации данных. Экспериментальные данные, поступающие в БРД в течение разряда плазмы, сохраняются в оперативной памяти ЭВМ [10, 11].

Глава 4. В IV главе изложены методы и результаты экспериментальных исследований и испытаний СИЭП. Проведен сравнительный анализ расчетных и фактических показателей качества измерительной системой. Приводятся результаты, показывающие степень эффективности разработанной СИЭП для выполнения функций измерения электромагнитных параметров на токамаке КТМ.

Схема стенда для проведения экспериментальных испытаний СИЭП показана на рис. 4.1. Стенд магнитных измерений был предоставлен организацией разработчиком электромагнитной диагностики токамака КТМ НИИ электрофизической аппаратуры им Д.В. Ефремова г. Санкт-Петербург.

К измерительным каналам СИЭП поочередно подключался датчик формы магнитной поверхности (ДФМП). Полученные результаты для каждого измерительного канала СИЭП сравнивались с результатами измерений, полученными с помощью образцового измерительного канала. Оценка погрешности осуществля-

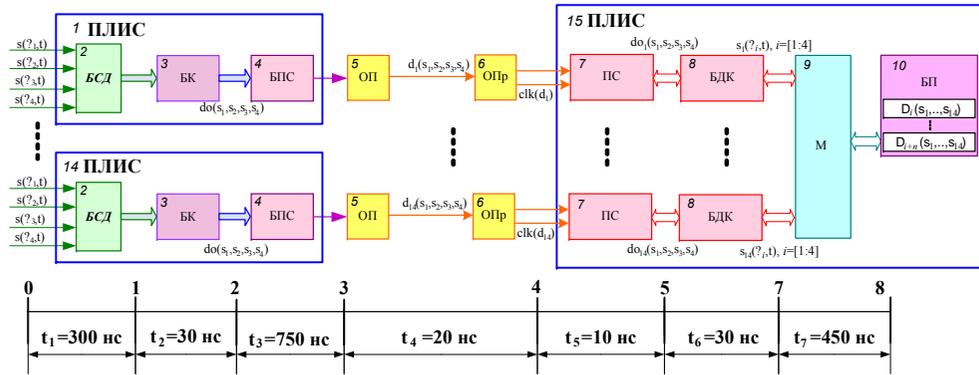


Рис. 2. 12. Структурная схема канала передачи данных СИЭП

1- программируемая логическая интегральная схема; 2-блок сбора данных с АЦП; 3-блок кодирования; 4-блок передачи сигналов; 5- оптический передатчик; 6 – оптический приемник; 7-приемник сигналов; 8 – блок декодирования; 9-мультиплексор; 10 – буферная память.

2) эффективным методом потенциального кодирования для представления сигналов в СИЭП является NRZ код. Поскольку необходимая скорость передачи данных составляет $R^* = 120$ Мбит/с, то частота тактирования сдвиговых регистров БПС и ПС должна составлять не менее $F_{clk1} = F_{clk2} = 120$ МГц;

3) период времени между стартом АЦ преобразования и записью данных в буферную память (общее время передачи данных с одного акта измерения) должен составлять $T_1 = 1.6$ мкс.

4) так как необходимым условием работоспособности каналов передачи данных является их избыточность по пропускной способности, то для реализации КПД СИЭП с учетом $R^* = 120$ Мбит/с необходимо и достаточно, чтобы его элементы обеспечивали $C = 130$ Мбит/с.

Глава 3. В данной главе представлены основные результаты разработки комплекса технических и программных средств СИЭП.

Система измерения электромагнитных параметров токамака КТМ состоит из двух уровней. Первый уровень включает 2 экранированных блока первичной обработки сигналов (БПОС). В каждый блок устанавливаются четырех каналные модули обработки сигналов (МПОС) в количестве 20 штук, которые выполняют функции аналоговой и цифровой обработки сигналов и их последующую передачу на верхний уровень системы по волоконно-оптическим линиям связи. В состав БПОС также входит один локальный модуль синхронизации (ЛМС). В течение разряда ЛМС передает импульсы синхронизации в модули обработки сигналов и тем самым обеспечивает синхронность аналого-цифрового преобразования сигналов с датчиков ЭМД во всех измерительных каналах [3, 4, 8].

В качестве обобщенной структуры СИЭП была предложена иерархическая структура с разветвленными вертикальными связями, представленная на рис. 1.8.

Основная идея обеспечения скорости передачи измерительной информации для выполнения циклов управления параметрами плазмы (3 и 0.3 мс) в реальном масштабе времени и сохранения данных без потерь в необработанном виде при разрядах плазмы с длительностью более 5 с. заключается в разветвлении информационных потоков.

Для реализации структуры СИЭП с разветвленными связями предлагается проводить цифровую обработку сигналов на нижнем уровне системы и передавать данные во внешние системы управления и в аппаратуру регистрации одновременно по независимым радиальным волоконно-оптическим каналам [1, 2]. Значение W_u для предложенной структуры СИЭП составило $0.31 \text{ \$} \cdot \text{Мбит} / \text{с}$.

Глава 2. Во второй главе особое внимание уделено разработке имитационной модели измерительного канала и канала передачи данных. По результатам модельных исследований были определены требования к составу и характеристикам элементов измерительного канала и канала передачи данных, требования к составу и функциям алгоритмов первичной обработки сигналов, сбора, передачи и регистрации экспериментальных данных, определены оптимальная частота дискретизации сигналов с датчиков и пропускная способность каналов передачи данных.

Структура типового измерительного канала СИЭП предложенная в диссертации, представлена на рис. 2.1 [3].

Элемент коррекции реализуется программно в виде разностного уравнения

$$y(n) = \sum_{k=0}^M a_k \cdot x(n-k) + \sum_{k=1}^N b_k \cdot y(n-k). \quad (2.1)$$

В качестве аналогового прототипа элемента коррекции предлагается использовать аperiодическое звено второго порядка с передаточной функцией аналогичной индукционному преобразователю [8].

$$W(s) = \frac{K}{T^2 \cdot s^2 + 2\xi \cdot T \cdot s + 1} \quad (2.2)$$

Серверы длительного хранения экспериментальных данных

Системы управления плазмой
Блок регистрации данных (СИЭП).

Аппаратура первичной обработки сигналов (СИЭП)

Первичные измерительные преобразователи (датчики ЭМД)

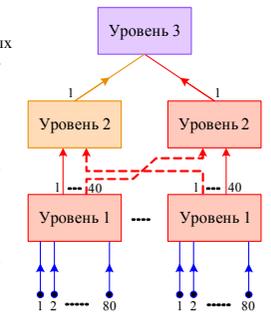


Рис. 1.8. Иерархическая структура СИЭП с разветвленными вертикальными связями

где, T – постоянная времени и $T^2 = L \cdot C$, K – коэффициент усиления $K=1$, ξ – коэффициент демпфирования $2\xi \cdot T = R \cdot C$.

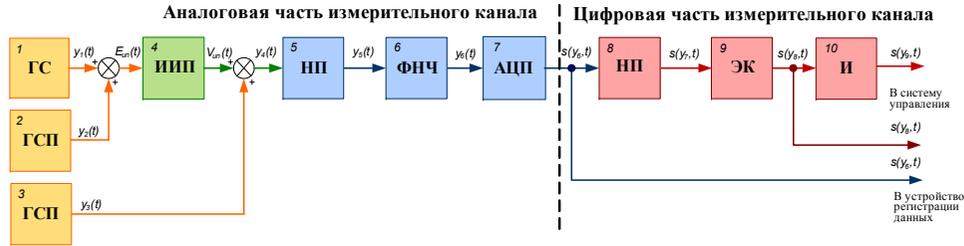


Рис. 2.1 Структурная схема измерительного канала СИЭП

1- генератор сигнала; 2, 3 – генератор сигнала помехи; 4- измерительный преобразователь; 5- нормирующий преобразователь; 6-аналоговый фильтр нижних частот; 7- аналого-цифровой преобразователь; 8-нормирующий преобразователь; 9- элемент частотной коррекции; 10 –интегратор.

Коэффициенты передаточной функции аналогового прототипа корректирующего элемента R , L и C определялись методом подбора, таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\begin{aligned} H_{ин}(f) \cdot H_{эк}(f) &= 1, \text{ при } f = 0-100 \text{ кГц} \\ H_{ин}(f) \cdot H_{эк}(f) &\rightarrow 0, \text{ при } f > 100 \text{ кГц} \end{aligned} \quad (2.3)$$

где, $H_{ин}(f)$ и $H_{эк}(f)$ - АЧХ измерительного преобразователя и аналогового прототипа элемента коррекции соответственно.

Пример подбора коэффициентов аналогового прототипа корректирующего элемента представлен на рис. 2.2. Для датчика с параметрами $C = 10$ нФ, $L = 14$ мкГн, $R = 200$ Ом коэффициенты передаточной функции аналогового прототипа элемента коррекции следующие $C = 50$ нФ, $L = 36$ мкГн, $R = 18.3$ Ом.

Как видно из рис. 2.2 элемент коррекции обеспечивает не только прямолинейность результирующей АЧХ измерительного канала в области частот 0-100 кГц, но и увеличение крутизны спада АЧХ в области задерживаемых частот (свыше 100 кГц) [8].

Результирующая функция преобразования сигнала во временной области для программной реализации элемента коррекции в явном виде с учетом $F_0 = 1$ МГц

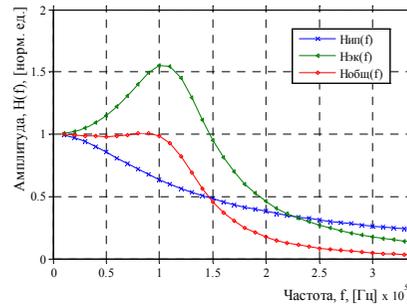


Рис. 2.2 АЧХ измерительного канала СИЭП с учетом коррекции

метром в экспериментах являлось соотношение S/N , которое принимало значение -60, +1, +3, +5, +6, +7 и +8 Дб.

Результаты проведенных экспериментов показали (рис. 2.10, 2.11), алгоритм численного интегрирования Гаусса обеспечивает меньшую погрешность по сравнению с методами Симпсона и трапеции в случае зашумленных сигналов. Применение частотной коррекция увеличивает помехоустойчивость измерительного канала (уменьшение погрешности в среднем на 0.8 % при увеличении уровня сигнала помехи от -60 до +8 Дб).

Для реализации каналов связи СИЭП был разработан и предложен метод асинхронной передачи измерительной информации. Модельные исследования канала передачи данных (КПД) проводились с целью определения: оптимальной скорости передачи данных (R^*); времени передачи данных с одного акта измерения (T_1); внутренней частоты тактирования передатчика и приемника цифровых сигналов (F_{clk});

минимальной пропускной способности элементов канала (C); проверки функциональности КПД.

Структура типового КПД СИЭП представленная на рис. 2.12. На рисунке также представлены результаты модельных исследований характеристик быстродействия элементов КПД. Цель экспериментов состояла в определении временных задержек t при прохождении цифровых сигналов через элементы канала [4].

В результате модельных исследований КПД СИЭП были определены следующие основные характеристики передатчика, приемника и линии связи:

1) оптимальная скорость передачи данных по линиям связи при частоте дискретизации сигналов $F_0 = 1$ МГц, разрядности АЦП $\log V_0 / V^* = 16$ бит и количестве сообщений (кодов АЦП) передаваемых одним передатчиком $k = 4$ шт. составляет $R^* = 120$ Мбит/с

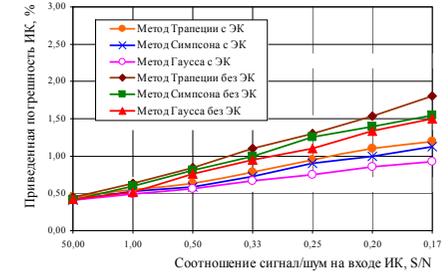


Рис. 2.10. Оценка точности методов интегрирования

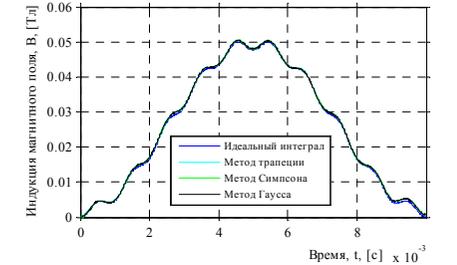


Рис. 2.11. Диаграмма изменения электромагнитного параметра

сти обработки сигнала без использования аналогового фильтра (отметка 0, рис. 2.8). Для задания уровня сигнала помехи использовалось соотношение сигнал/шум $S/N=+1$ Дб. Т.е. при максимальной амплитуде полезного сигнала $y_1(t) = 50$ В средний уровень сигнала помехи составлял 50 В.

Увеличение приведенной погрешности с ростом порядка фильтра $n > 2$ объясняется увеличением фазового сдвига, в результате этого вклад в результирующую погрешность от фазовой задержки превышает выигрыш в точности от ослабления амплитуды сигнала помехи.

Следующим этапом исследований проводился анализ зависимости погрешности преобразования сигналов от частоты дискретизации F_d , последняя выбиралась равной 0.25, 0.5, 1, 2, 5 и 10 МГц. Результаты исследований представлены на рис. 2.9.

В качестве постоянных параметров в экспериментах, как и в предыдущем случае, использовалось соотношение $S/N=1$ Дб. Порядок аналогового фильтра составлял $n = 2$ и при этом проводилась частотная коррекция сигналов.

Для обеспечения погрешности $<1\%$ частота дискретизации должна составлять 1 МГц. Увеличение F_d не приводит к значительному увеличению точности измерений и поэтому не является целесообразным. Уменьшение $F_d < 1$ МГц приводит к резкому увеличению погрешности преобразования сигналов и, следовательно, к снижению объема достоверной информации.

Заключительным этапом модельных исследований измерительного канала являлась оценка влияния S/N и частотной коррекции на точность интегрирования сигналов. Результаты модельных исследований представлены на рис. 2.10.

Погрешность оценивалась для трех методов интегрирования одновременно, для случая использования элемента коррекции в ИК и без него [9].

Постоянными параметрами экспериментов являлись порядок аналогового фильтра $n = 2$ и частота дискретизации сигналов $F_d = 1$ МГц. Изменяемым пара-

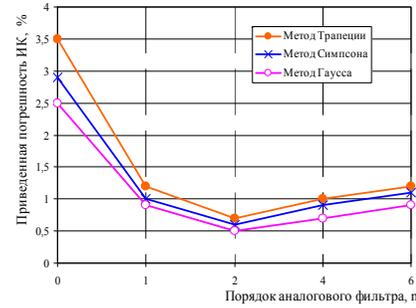


Рис. 2.8. Зависимость погрешности от порядка АФНЧ

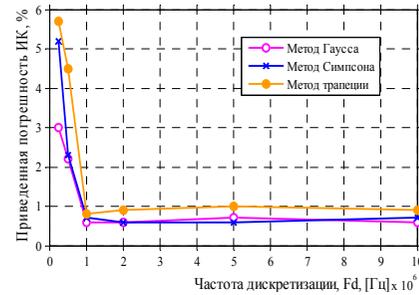


Рис. 2.9. Зависимость погрешности преобразования сигналов от частоты дискретизации

$$y(z) = 4.310 \cdot 10^{-5} \cdot x(z) + 8.620 \cdot 10^5 \cdot z^{-1} x(z) + 4.310 \cdot 10^{-5} \cdot z^{-2} x(z) - 1.931 \cdot z^{-1} y(z) + 0.931 \cdot z^{-2} y(z) \quad (2.4)$$

Для реализации элементов коррекции датчиков ЭМД токамака КТМ была составлена таблица, включающая коэффициенты разностных уравнений для каждого отдельного датчика. Подбор коэффициентов осуществлялся с помощью модели индукционного измерительного преобразователя, при этом также учитывались характеристики R , L и C проводных линий связи для подключения датчиков к измерительной аппаратуре СИЭП.

Сигналы на выходе датчиков ЭМД пропорциональны скорости изменения потока магнитного поля и тока, для случая поясов Роговского, при этом для восстановления косвенных параметров плазмы (формы, тока, положения и т.д.) необходимо знать одновременно скорости изменения электромагнитных параметров (значения производной) и их значения в явном виде [2].

$$E_{u.n.} = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (2.5)$$

Для расчета текущего значения потока магнитного поля и тока, регистрируемых датчиками ЭМД, в измерительных каналах СИЭП предлагается использовать цифровой интегратор, основанный на численном методе (квадратуре) Гаусса по пяти отсчетам.

С точки зрения теоретических аспектов, численный метод Гаусса может применяться только для расчета интеграла от функций заданных в аналитическом виде, поскольку в процессе вычислений используются одновременно два значения функции при аргументах (отсчетах времени) несовпадающих с шагом дискретизации. Расчетное соотношение (2.6) является вырожденной интерпретацией метода Гаусса для определения интеграла от функции заданной на элементарном участке $[t_{i-1}, t_i]$ в виде пяти дискретных отсчетов (рис. 2.3).

$$I_{G_i} \approx \frac{t_i - t_{i-1}}{2} \left(f_1 \left(\frac{t_{i-1} + t_i}{2} - \frac{t_i - t_{i-1}}{2\sqrt{3}} \right) + f_2 \left(\frac{t_{i-1} + t_i}{2} + \frac{t_i - t_{i-1}}{2\sqrt{3}} \right) \right) \quad (2.6)$$

Для вычисления значения интеграла методом Гаусса на элементарном шаге интегрирования используется значения функции: f_1 и f_2 , при этом интеграл охватывает пять значений функции отстоящих друг от друга на одинаковом расстоянии. Если предположить ситуацию при которой $t_{i-1} = 1$, $t_i = 5$ и шаг дискретизации сигнала выбран равный $(t_i - t_{i-1}) / 4 = 1$, то согласно (2.6) используемые значения функции находятся при аргументах $f(1.85)$ и $f(4.16)$ как показано на рис. 2.3 [9]. В реальных условиях эти значения неизвестны, поскольку шаг дискретизации в

СИЭП является постоянным и в данном примере равен 1. Из рис. 2.3 видно, что значения функции при аргументах необходимых для вычисления и при известных аргументах отличаются незначительно.

В диссертации сделано предположение $f(1.85) \approx f(2)$, $f(4.16) \approx f(4)$ и сформулирована гипотеза о том, что метод Гаусса может применяться для интегрирования сигналов в реальном масштабе времени при равномерном шаге дискретизации и заданной в аналитическом виде функции $f(t)$.

Данная гипотеза была подтверждена в результате проведения модельных исследований измерительного канала. [9].

При проведении модельных исследований на вход измерительного канала подавался тестовый сигнал представленный линейной суммой сигнала помехи и идеального синусоидального сигнала с датчика (рис. 2.4). Идеальный тестовый сигнал включал четыре гармонические составляющие из диапазона полезного сигнала [0:100] кГц.

Для моделирования внешних помех рассматривался нормальный закон распределения (распределение Гаусса) сигнала помехи (рис. 2.5).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2 \cdot \sigma_x^2}} \quad (2.7)$$

где, x – носитель $\in (-\infty; +\infty)$, m_x – математическое ожидание носителя, σ_x^2 – дисперсия носителя.

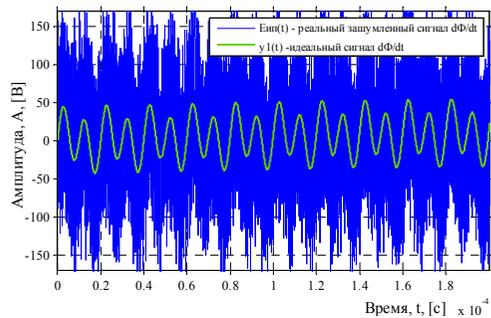


Рис. 2.4 Форма тестового сигнала датчика ЭМД

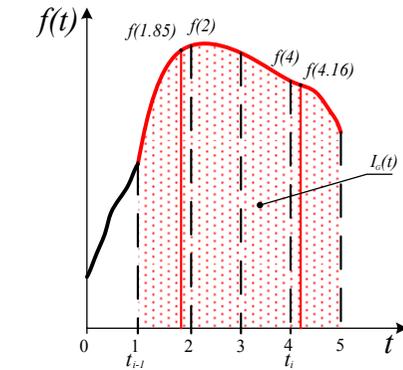


Рис. 2.3. Численное интегрирование методом Гаусса по пяти отсчетам

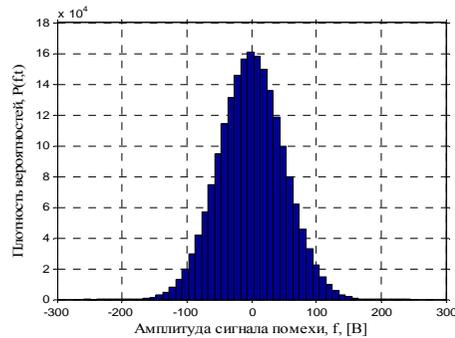


Рис. 2.5 Плотность распределения вероятностей сигнала помехи

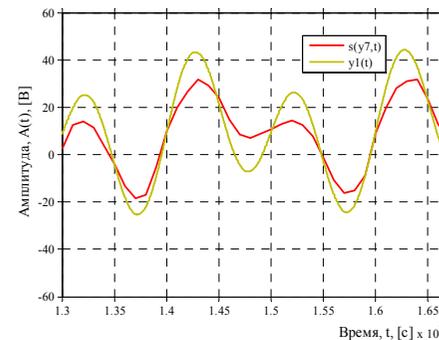
Расчет погрешности алгоритмов первичной обработки сигналов осуществлялся с учетом идеализированного представления потока магнитного поля и скорости его изменения ($y_i(t)$, рис. 2.4) по формуле для оценки приведенной погрешности (2.8). Приведенная погрешность рассчитывалась на каждом элементарном шаге интегрирования по пяти дискретным отсчетам сигнала через интервал $4 \cdot T_d$ где, T_d - период дискретизации сигналов.

Эксперименты с одинаковыми начальными условиями и случайным характером помех проводились $n=10$ раз. После проведения 10 опытов рассчитывалась средняя квадратичная ошибка абсолютного отклонения на каждом элементарном шаге интегрирования и далее приведенная погрешность относительно максимального значения измеряемого параметра. Из ряда приведенных погрешностей находилось максимальное значение, получаемое за время работы измерительного канала (время эксперимента).

$$\gamma_{прив.}^{макс.} = \max \left[\frac{\left(\sqrt{\sum_{i=1}^n [I_i^{ид}(k \cdot 4 \cdot T_d) - I_i(k \cdot 4 \cdot T_d)]^2 / (n-1)} \right)}{I_{макс}^{ид}} \cdot 100\% \right] \quad (2.8)$$

k – номер шага интегрирования, $I_i^{ид}(k \cdot 4 \cdot T_d)$ – значение интеграла от идеального сигнала $y_i(t)$ на k -ом шаге при i -ом опыте, $I_i(k \cdot 4 \cdot T_d)$ – значение интеграла от зашумленного сигнала $y_i(t)$ на k -ом шаге при i -ом опыте, $I_{макс}^{ид}$ – максимальное значение интеграла от идеального сигнала $y_i(t)$ [10].

Далее представлены результаты модельных исследований:



На рис. 2.6 Форма сигнала после оцифровки и нормировки.

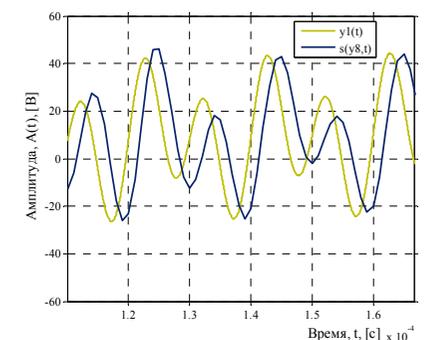


Рис. 2.7 Форма сигнала после цифровой частотной коррекции

Для выбора оптимального метода аналоговой фильтрации сигналов рассматривались фильтры с порядком 1, 2, 4 и 6, также была проведена оценка погрешно-