

**ИНФОРМАЦИОННО - ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ**

И.В. Белицын

Алтайский государственный технический университет

им. И.И.Ползунова

e-mail: b_i_w@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы контроля, мониторинга и оценки параметров магнитной составляющей электромагнитного поля, создаваемого различными техническими объектами, в том числе и воздушными линиями электропередачи. Предложена и обоснована блок схема измерительного устройства, а также его электрическая схема. Приведена методика обработки выходных сигналов для определения параметров эллиптического магнитного поля, включающая в себя аппаратную функцию.

Ключевые слова: информационно - измерительная система, усилитель, фильтр, промышленная частота, вектор магнитной индукции, датчик Холла, методика расчета.

В настоящее время большое значение придается вопросам электромагнитной совместимости (ЭМС), кроме этого одним из факторов воздействующим на окружающую среду и человека является электромагнитное загрязнение [1], создаваемое высоковольтными установками. Поэтому актуальной задачей является мониторинг электромагнитного поля, а для этого необходимы технические средства измерений. Рассмотренные в [2] приборы предназначены для измерения параметров ЭМП только в одной точке, кроме этого, большинство из этих приборов не может быть удалено от места измерений. Поэтому оценка параметров ЭМП и, в частности, электрического и магнитного поля МП, эксплуатируемых объектов электроэнергетики, не могут быть рационально реализованы с помощью указанных приборов.

Требуются измерения различных физических величин, таких как температура, влажность, напряженность электрического и магнитного поля, в большом числе точек за ограниченный интервал времени. При этом результаты измерений должны быть сосредоточены в одном центре. Очевидно, что даже простое наблюдение и регистрация показаний измерительных приборов выходит за возможности оператора, не говоря уже об обработке результатов измерений с целью сделать требуемые выводы и заключения.

Для решения этой задачи возможно и целесообразно применить измерительные устройства, получившие названия информационно-измерительных систем (ИИС). В ИИС измери-

тельную информацию о физических величинах в большом числе точек с первичных измерительных преобразователей по каналам связи поступает в централизованное автоматическое устройство, которое по определенной программе обрабатывает и хранит первичную измерительную информацию и выдает в удобной форме комплексные данные.

Исходными данными для проектирования ИИС являлись напряжение питания 5В (USB), число точек (узлов) измерения – 1000 количество каналов с одной точки измерения – 3, основная гармоника промышленной частоты – 50 Гц, ослабление сигнала за полосой 40-60 Гц > 10db, напряжение входного сигнала – 0.005 В – 10В, источник питания пассивных датчиков - ±5В.

ИИС выполнена на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ZET 210 предназначенного для измерений параметров сигналов с 16 входов в широком частотном диапазоне (с частотой дискретизации до 400 кГц), поступающих с различных первичных преобразователей. Подключение модуля ZET 210 к ПЭВМ осуществляется по шине USB 2.0, по ней же происходит питание модуля.

При использовании флэш-накопителя модуль ZET 210 может использоваться в режиме автономного регистратора при этом сценарий записи (каналы, частота дискретизации, режим записи и т.д.) задается с компьютера с помощью поставляемого в комплекте программным обеспечением. В автономном режиме питание осуществляется от блока аккумуляторов или преобразователя 220 В→5 В. Для последующей обработки анализа записанных временных данных модуль АЦП подключается к ПК по шине USB 2.0 и воспроизводит сигналы из файлов.

Расширение числа входов АЦП Zet210 реализуется за счет использования аналоговых мультиплексоров (MUX), имеющих один или более управляющих входов и один выход. Мультиплексор позволяет передать сигнал с одного из входов на выход, при этом выбор желаемого входа осуществляется подачей соответствующей комбинации управляющих сигналов, и электрически соединяет выбранный вход с выходом.

MUX в общем случае можно представить в виде коммутатора, управляемого входной логической схемой. В качестве этой схемы используется сам модуль Zet210.

Входные аналоговые сигналы S_i поступают на входы коммутатора и через коммутатор передаются на выход D. Управление коммутатором осуществляется входной логической схемой. В цифровых мультиплексорах логические элементы коммутатора и дешифратора обычно объединяются. На вход логической схемы подаются адресные сигналы A_k . Мультиплексоры могут иметь дополнительный управляющий вход E, который может разрешать или запрещать прохождение входного сигнала на выход D.

В качестве электронного выбран 16-канальный аналоговый мультиплексор/демультиплексор типа ADG406 (16-channel analog multiplexer/demultiplexer).

Его структурная схема представлена на рисунке 1.

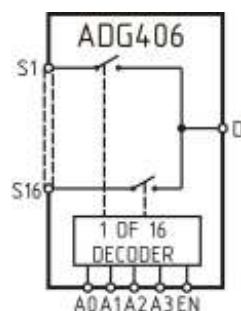


Рисунок 1 - Структурная схема ADG406

Управление коммутатором осуществляется входной логической схемой по 4 каналам. Выбор необходимого канала осуществляется подачей на вход логической схемы необходимой последовательности сигналов, которая приведена в таблице 1.

Таблица 1 Управление MUX

A 3	A 2	A 1	A 0	E N	Подключен- ный вход
X	X	X	X	0	Нет
0	0	0	0	1	1
0	0	0	1	1	2
0	0	1	0	1	3
0	0	1	1	1	4
0	1	0	0	1	5
0	1	0	1	1	6
0	1	1	0	1	7
0	1	1	1	1	8
1	0	0	0	1	9
1	0	0	1	1	10
1	0	1	0	1	11
1	0	1	1	1	12
1	1	0	0	1	13
1	1	0	1	1	14
1	1	1	0	1	15
1	1	1	1	1	16

Для расширения числа входов до 4096 штук реализуется алгоритм аппаратного умножения, который заключается в каскадном включении мультиплексоров и представляет собой последовательное подключение к выходу одного последующего мультиплексора. Таким образом, используя шестнадцативходовый мультиплексор, двухуровневое включение позволяет расширить число входов до $16 \times 16 = 256$. Подключив такие сегменты (далее - матрицы) к 16 входам АЦП, количество входов расширяется до 4096 (рисунок 2)

Входы сгруппированы в 16 матрицы по 256 входов. Каждая матрица содержит 16 модулей. Каждый модуль содержит 16 входов. Таким образом, количество входов рассчитывается как $(16 \text{ матриц}) \times \{(16 \text{ модулей}) \times (16 \text{ входов})\} = \text{всего } 4096 \text{ входов}$

Каждый вход имеет свой адрес, например первый вход, будет находиться в первой матрице в первом модуле и иметь адрес 1-1-1, а 4096 вход находится в 16^й матрице в 16 модуле и имеет адрес 16-16-16.

На входы всех коммутаторов первого уровня подается одна общая группа сигналов (селектор модуля), определяющая подключенный модуль. На входы всех коммутаторов второго уровня подается другая общая группа сигналов (селектор входа), определяющая подключенный вход.

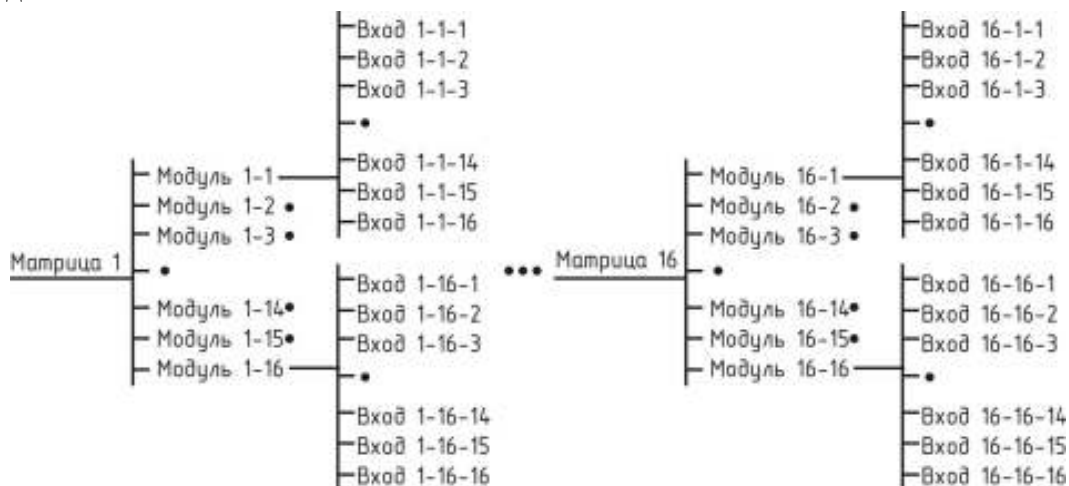


Рисунок 2 - Организация матриц входов

Например, если через селектор модуля подается сигнал на вход $A3=0$, на вход $A2=1$, на вход $A1=0$, на вход $A0=0$, то во всех матрицах подключается пятый модуль (таблица 1). Аналогично и для подключения входа. Таким образом, к каждому входу АЦП подключается группа входов, определенная номером модуля и номером входа в этом модуле.

Первичный преобразователь. По итогам проведенного анализа первичных преобразователей для измерения напряженности магнитного поля: магнитомеханических, феррозондовых, индукционных, магниторезистивных, основанных на эффекте Холла и ядерного магнитного резонанса [3, 4].

В качестве первичного преобразователя был выбран датчик на эффекте Холла компании Honeywell с линейным выходом SS495A2. Он состоит из полупроводникового элемента Холла, стабилизатора питания, дифференциального усилителя и выходного каскада. Выходное напряжение этого датчика находится в линейной зависимости от величины вектора магнитной индукции и за пределами рабочей области датчик входит в насыщение. При отсутствии внешнего магнитного поля напряжение на выходе равно половине напряжения питания. Размах выходного напряжения и чувствительность датчиков находятся также в линейной зависимости от напряжения источника питания (пропорциональный выход). Этот тип датчиков характеризуется высокой нагрузочной способностью, линейной характеристикой преобразования в рабочем диапазоне магнитных полей, широким диапазоном рабочих температур и ЭФТЖ, т. 6, 2011

питающих напряжений, долговременной стабильностью параметров и малым током потребления.

Для питания первичного преобразователя используется источник опорного напряжения, в результате выходной сигнал был с гораздо меньшим количеством искажений.

Исследования проведенные, как с помощью математических моделей, так и с помощью натуральных экспериментов значения напряженности магнитного поля вблизи поверхности земли лежат обычно в диапазоне от 0,01 до 40 А/м, что соответствует 0,00013 - 0,5 Гс. Таким образом, для надежной регистрации сигнала необходим предварительный усилитель с коэффициентом усиления 1000. В этом случае при использовании датчика SS495A с характеристикой приведенной на рисунке 3 мы сможем измерять

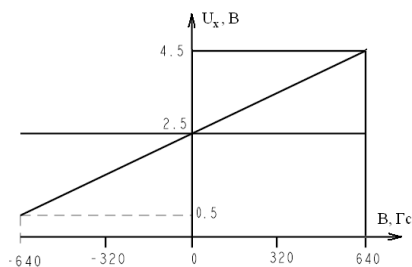


Рисунок 3 – Зависимость напряжения Холла от индукции магнитного поля при напряжении питания 5 В

напряженность магнитного поля в диапазоне 0,025 - 51 А/м с дискретностью не более 0,03 А/м.

На рисунке 4 представлена блок схема устройства для одной точки измерения.

Усилитель. Поскольку напряжение сигнала с датчиков изменяется в широких пределах, необходимо использовать усилитель с регулируемым коэффициентом усиления [5]. Усилитель должен обеспечивать высокое входное сопротивление для работы с различными датчиками. При использовании дифференциальных датчиков, усилитель должен обеспечивать высокую степень подавления синфазного сигнала.

Данным требованиям соответствует инструментальный усилитель, предназначенный для задач, требующих прецизионного усиления с высокой точностью передачи сигнала.

Инструментальный усилитель относится к классу операционных усилителей с одним принципиальным отличием, связанным с работой исключительно с замкнутыми линейными цепями обратных связей. Поэтому в инструментальных усилителях отсутствует в качестве контролируемого параметра коэффициент усиления с разомкнутой обратной связью. Вместо этого вводятся параметры точности и нелинейности передачи сигналов при выбранных фиксированных значениях коэффициентов усилений по напряжению, обычно, 1, 10, 100, 1000.

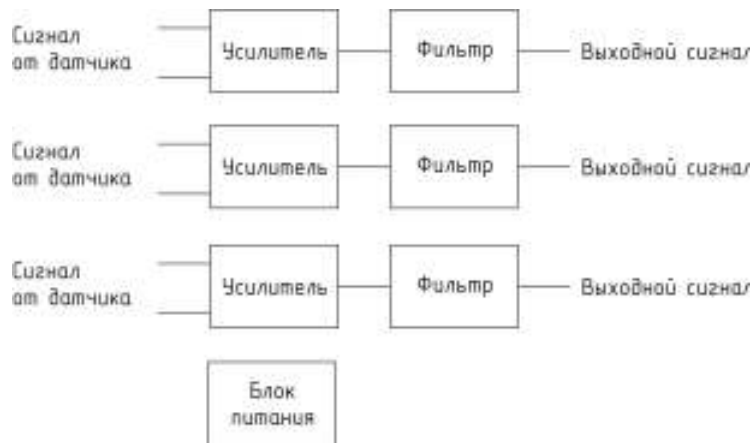


Рисунок 4 - Блок схема устройства для измерения в одной точке

Измерительный усилитель представляет собой двухкаскадный усилитель. Первый каскад — дифференциальный усилитель на двух взаимосвязанных неинвертирующих усилителях. Для повышения входного сопротивления входной каскад строят на двух отдельных (не взаимосвязанных) неинвертирующих усилителях. Второй каскад — дифференциальный инвертирующий усилитель. Буферные взаимосвязанные неинвертирующие усилители увеличивают входное сопротивление (импеданс) низкоимпедансного, дифференциального, инвертирующего усилителя.

Модернизацией классической схемы ИУ, является схема AD623 (рис 5) фирмы ANALOG DEVICES. Микросхема AD623 представляет из себя микромощный инструментальный усилитель общего применения. Гибкая структура из трех операционных усилителей и малый размер делают его идеальным для множества применений. Входная цепь с обратной связью по току обеспечивает широкую полосу пропускания даже при высоком коэффициенте усиления (70 кГц при $K_U = 100$). На три внешних резистора устанавливают один из коэффициентов усиления 1, 10, 100. Внутренние цепи защиты входного каскада выдерживают напряжение до ± 40 В без повреждения прибора. Лазерная подгонка обеспечивает очень низкое напряжение смещения (50 мкВ), малый дрейф (0.5 мкВ/°C) и высокий коэффициент подавления синфазных входных сигналов (110 дБ при $K_U = 1000$).

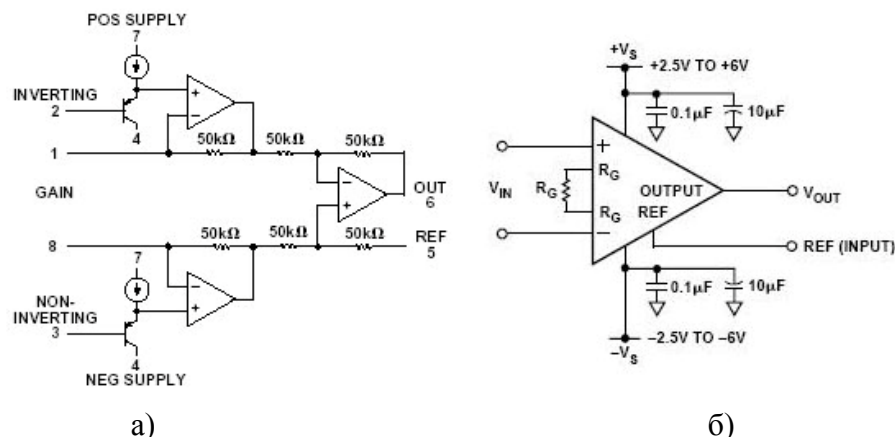


Рисунок 5 - Инструментальный усилитель AD623, а) принципиальная схема, б) условное обозначение

Она наилучшим образом подходит для проектируемой измерительной системы, для усиления малых сигналов на фоне высоких синфазных помех.

Фильтр. Для получения необходимой характеристики сигналов от датчиков необходимо использование полосового фильтра, который может быть пассивным или активным [6, 7].

В качестве пассивных фильтров широко применяются LC-фильтры, т.е. цепи, содержащие реактивности разных знаков. Благодаря резонансным явлениям в таких цепях выделяются колебания, находящиеся в полосе пропускания.

Однако, вместо значительных затрат средств на совершенствование теории, технологии и изготовления LC-фильтров, расширяется тенденция по исключению последних из современной электронной аппаратуры, поскольку интегральные схемы полностью изменили обычные системы и критерии, принятые раньше в разработках. В качестве активного прибора неизменно используется операционный усилитель благодаря своим исключительным свойствам и приемлемой стоимости. Термин «активные фильтры» включает множество различных построений схем и методов проектирования, важнейшие из которых можно сгруппировать в следующие три категории:

Каскадное проектирование фильтров. Здесь подразумеваются изолированные звенья фильтров второго, соединяемые каскадно для реализации требуемых передаточных функций более высокого порядка.

Имитация LC-фильтров. Исходной позицией является структура LC-фильтра. Далее она реализуется либо имитацией каждой индуктивности гираторно-конденсаторной цепью, либо преобразованием первоначальной схемы фильтра.

Связанные фильтры. В общем случае здесь исходной точкой является каскадное соединение активных фильтров первого и второго порядков (предпочтительно функциональных узлов общего назначения), которые затем охватываются дополнительными петлями отрицательной обратной связи.

Схемы активных фильтров. Фильтр на источнике напряжения, управляемом напряжением (ИНУН). В фильтрах на ИНУН используется минимальное число элементов (один операционный усилитель на два полюса характеристики), при этом они дают дополнительный выигрыш в виде не инвертирующего коэффициента усиления, низкого выходного полного сопротивления, малого разброса значений параметров, простоты регулировки коэффициента усиления и способности работать при большом коэффициенте усиления или высокой добротности.

Фильтры, построенные на основе метода переменных состояния. Двухполюсный фильтр куда более сложен по сравнению с фильтрами на ИНУН, но он широко применяется благодаря повышенной устойчивости и легкости регулировки. Кроме того, частоту фильтра можно регулировать при неизменном значении добротности Q (или неизменной полосе пропускания - по выбору) характеристики в полосе пропускания.

Наиболее близко к фильтру на основе метода переменных состояния примыкает так называемый биквадратный фильтр. В этой схеме также используются три ОУ.

Для выбора схемы фильтра будем опираться на следующие условия: минимальное число пассивных элементов; минимальная чувствительность передаточных характеристик к изменению пассивных элементов; простые настройка и способы производства; минимальный разброс номиналов элементов, в частности при использовании гибридно-интегральных (например, тонкопленочных) пассивных элементов.

За основу фильтра возьмем схему, построенную на основе метода переменных состояния. Расчет схемы по исходным данным производим в программе Filter Wiz Pro. Рассчитанная схема фильтра представлена на рисунке 6.

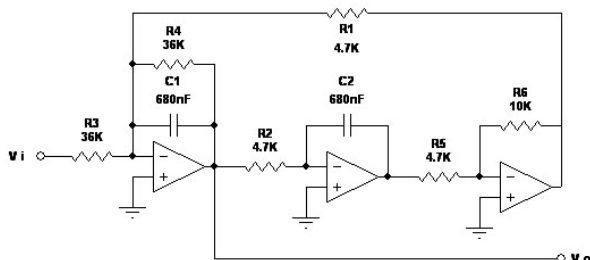
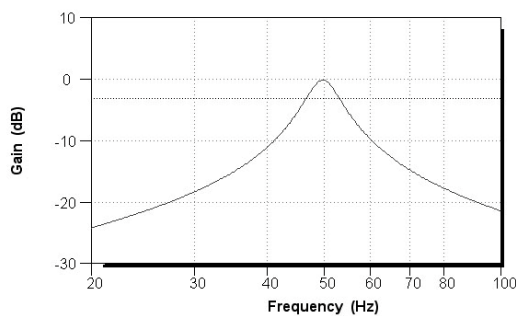
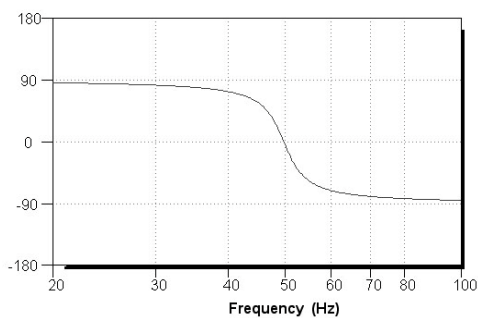


Рисунок 6 - Расчетная схема фильтра

Амплитудо–частотная и фазо-частотная характеристики показаны на рисунке 7.



а)



б)

Рисунок 7 - Характеристики фильтра

а) амплитудо–частотная характеристика, б) фазо-частотная характеристика

Следовательно, рассмотренные схемы инструментального усилителя и фильтра удовлетворяют требованиям проектируемой ИИС. Электрическая схема усилителя и фильтра

для трех первичных преобразователей, расположенных в трех взаимноперпендикулярных плоскостях и в одной точке измерения, приведена на рисунке 8.

Для тестирования фильтра использовалось магнитное поле, создаваемое соленоидом и регулируемое с помощью изменения протекающего по нему тока.

На рисунке 9 а, показаны формы сигнала на входе и выходе фильтра при помещении датчика внутрь соленоида, коэффициент усиления выбран равным 1.

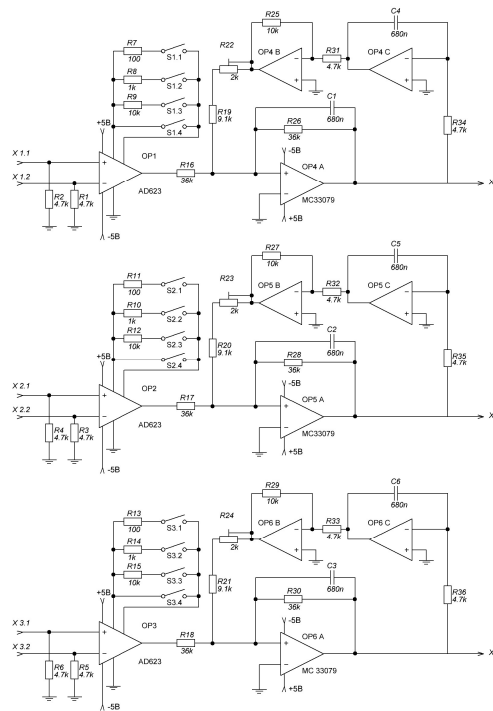


Рисунок 8 – Электрическая схема усилителя и фильтра

При малой величине сигнала необходимо масштабировать его для точного измерения. На рисунке 9 б, видно, что при увеличении сигнала в 1000 раз, что уровень шумов очень большой, но на выходе фильтра получаем чистую синусоиду основной гармоники

Обработка полученной первичной информации. Для определения параметров эллиптически поляризованного магнитного поля необходимо использование трех первичных преобразователей, расположенных в трех взаимноперпендикулярных плоскостях. Таким образом, сигнал каждого преобразователя будет проекцию магнитного поля на независимые координаты, так в декартовых координатах

$$\begin{cases} H_x = A \sin(\omega t + \alpha), \\ H_y = B \sin(\omega t + \beta), \\ H_z = C \sin(\omega t + \gamma), \end{cases} \quad (1)$$

где А, В, С – амплитудные значения напряженности переменного поля по осям x, y, z; α, β, γ – начальные значения фаз колебаний вдоль тех же осей, ω – циклическая частота колебания напряженности магнитного поля, которая совпадает с частотой основной

гармоники напряжения промышленной частоты $\omega=314 \text{ с}^{-1}$. Зависимость напряженности магнитного поля от времени:

$$\begin{aligned} H^2(\omega t) &= H_x^2 + H_y^2 + H_z^2 = \\ &= A^2 \sin^2(\omega t + \alpha) + B^2 \sin^2(\omega t + \beta) + \\ &+ C^2 \sin^2(\omega t + \gamma). \end{aligned} \quad (2)$$

В [8] показан переход от параметрической формы записи эллиптически поляризованного поля к канонической форме записи.

Таким образом, предлагаемая ИИС, имеющая блочно-модульную конструкцию выполняет как прямые, косвенные так и совокупные измерения; причем в последних двух случаях - на основе прямых измерений и соответствующей математической обработки. Разработанная ИИС включает следующие основные узлы:

1. Комплект измерительных преобразователей (датчики Холла) с усилителем и фильтром, которые воспринимают измеряемые физические величины и соединяют ИИС с исследуемым объектом;

2. Мультиплексоры, предназначенные для поочередного подключения измерительных преобразователей к системе или временного разделения каналов;

3. АЦП, осуществляющее преобразование всех измеряемых величин в единую физическую величину, с операциями масштабирования входных величин; 4. Программа, выполняющая собственно измерительные операции (сравнение с мерой, квантование, кодирование, входит в комплект поставки АЦП);

5. Программа математической и логической обработки измерительной информации для проведения косвенных или совокупных измерений;

6. Устройство хранения информации, состоящие из запоминающих устройств и преобразователей информации в виде удобном для дальнейшей переработки (USB-флеш-накопитель);

7. Выходное устройство, предназначенное для передачи информации человеку (дисплей).

Кроме того, ИИС позволяет, в зависимости от характера измерительных процессов, выбирать шаг квантования как по времени, так и по уровню, а также опрашивать нужный канал.

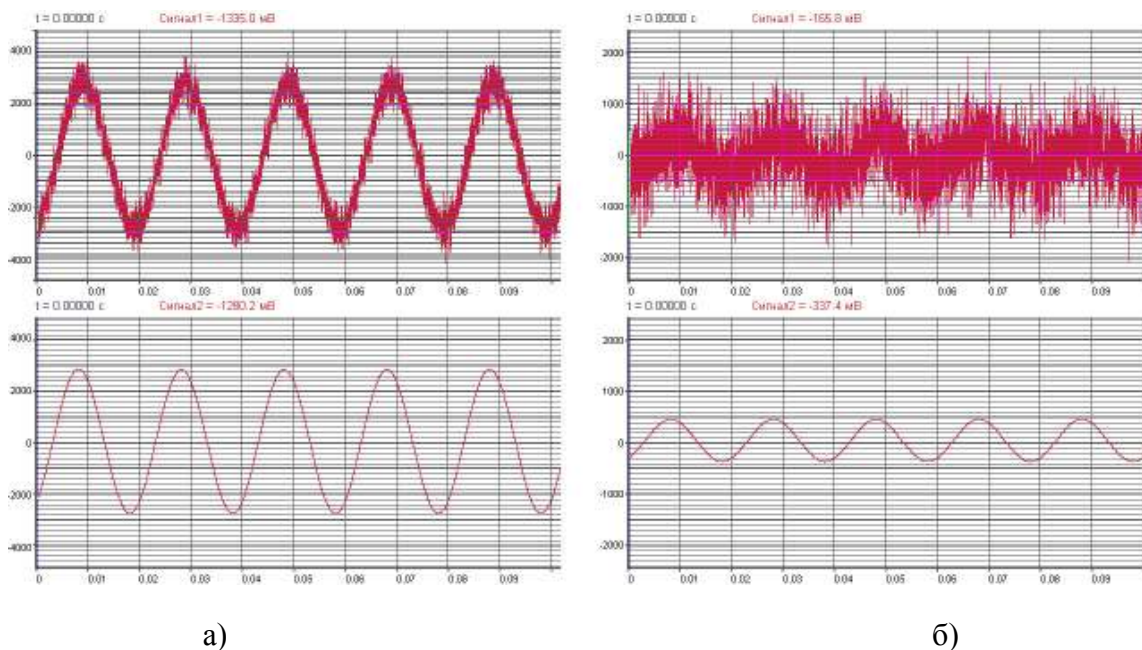


Рисунок 9 - Формы сигналов на входе (Сигнал 1) и выходе (Сигнал 2) фильтра, а) коэффициент усиления = 1, б) коэффициент усиления = 1000

Выводы:

- 1 Проанализировано и выбрано схемное решение усилителя с фильтром на основе метода переменных состояний,
2. Произведенный расчет параметров схемы фильтра и его характеристик показал, что ослабление сигнала за полосой пропускания 40-60 Гц более 10db .
3. ИИС имеющая предложенную блочно-модульную конструкцию оптимально подходит для задач мониторинга ЭМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белицын И.В., Котырло Т.В., Макаров А.В. Электрическое поле высоковольтных электрических установок, проблемы нормирования, расчета и моделирования // Ползуновский вестник 2006- № 4-2. С. 387-393.
2. Белицын И.В. Получение и анализ Экспериментальных данных электрического поля воздушной линии электропередачи // Ползуновский вестник 2010- № 4-2. С. 150-15.
3. Белицын И.В., Старухин Р.С. Первичные преобразователи измерительной системы для мониторинга параметров магнитного поля. Материалы VIII Международной научно практической конференции «Экология и ресурсов энергосберегающие технологии на предприятиях народного хозяйства». – Пенза, 2008. с. 123-125
4. Белицын И.В., Старухин Р.С. Измерительная система для мониторинга параметров магнитного поля. Материалы VIII Международной научно практической конференции «Экология и ресурсов энергосберегающие технологии на предприятиях народного хозяйства». – Пенза, 2008. с. 125-127

5. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков: Пер. с англ. Горшков Б. Л. СПб.: ЗАО АВТЕКС, 2000. – 311 с.
6. Мошиц Г., Хорн П. Проектирование активных фильтров: Пер. с англ.— М.: Мир, 1984. — 320 с, ил.
7. Хьюлсман Л. П., Аллен Ф. Е. Введение в теорию и расчет активных фильтров: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1984. - 384 с.
8. Белицын И.В., Котырло Т.В., Макаров А.В. Эллиптическое электрическое и магнитное поля электроустановок. Метод их расчета и нормирования // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 4. Энергетика С. 61-65.