

На правах рукописи

ПАВЛЕНКО Антон Владимирович

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЦИФРОВЫЕ ИНТЕГРАТОРЫ ДЛЯ
ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В
ЭЛЕМЕНТАХ УСКОРИТЕЛЕЙ

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Батраков Александр Матвеевич – доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Костромин Сергей Александрович – доктор физико-математических наук, начальник Научно-экспериментального отдела сверхпроводящих магнитов и технологий отделения №1 Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна.

Серов Анатолий Федорович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории проблем энергосбережения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Центр нано-, био-, информационных, когнитивных и социогуманитарных наук Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2015 г. в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «_____» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.В. Бурдаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В ускорительной технике магнитные элементы играют особую роль. Они определяют принципиальные параметры ускорительных установок, в связи с чем весьма жёсткие требования предъявляются к характеристикам магнитных полей в этих элементах. Несмотря на то, что вычислительные методы, применяемые при проектировании магнитов, достигли очень хорошего уровня, окончательный вердикт о соответствии предполагавшихся и полученных характеристик выносится на основании магнитных измерений. Большой комплекс таких измерений выполняется на этапе разработки магнитов, а далее – контролируется работа магнитов в штатном режиме на действующей установке.

Типичный диапазон полей в ускорительной технике лежит в интервале от сотен микро тесла до десятков тесла. Причем, зачастую определить характеристики полей необходимо с погрешностью лучшей, чем 10^{-4} , а иногда и 10^{-5} . Из возможных методов магнитных измерений наиболее удовлетворительным как по динамическому диапазону, так и по точности является индукционный метод. Этот метод, обеспечивая измерение как импульсных, так и квазипостоянных магнитных полей, обладает лучшими по точности характеристиками, чем измерения датчиками Холла и в отличие от ЯМР-метода, может применяться для работы с неоднородными полями.

Уникальные возможности индукционных измерений объясняют активно проводимые работы по совершенствованию и аппаратуры, и способов измерений, и программного обеспечения во многих ускорительных центрах и приборостроительных компаниях мира, что свидетельствует об актуальности настоящей диссертации.

Магнитные измерения, основанные на индукционном методе, требуют соответствующих аппаратных средств и в первую очередь - интегрирующих измерителей. Развитие современной элементной базы делает привлекательным построение интегрирующих измерителей на основе аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Действительно, представляется очевидным, что достаточно получить цифровой образ сигнала с помощью быстродействующего и точного АЦП, просуммировать отсчёты в течение необходимого времени интегрирования и, умножая сумму на интервал между отсчётами, определить соответствующий интеграл. Однако, как показывает аккуратный анализ возможностей подобного способа, ему присущи погрешности, проявляющие себя подчас весьма неожиданным, непредвиденным образом. В этой связи представляется востребованным и актуальным детальный анализ источников ошибок цифрового интегрирования и поиск путей их минимизации.

Цель диссертационной работы

Целями настоящей работы являлись:

- детальный теоретический анализ и экспериментальные исследования метода цифрового интегрирования, и его дальнейшее развитие на основе этих исследований;
- разработка многофункциональных прецизионных интегрирующих устройств, которые решали бы максимально широкий спектр задач как в области измерений импульсных магнитов с рабочим циклом в несколько микросекунд до исследований процессов с длительностью в десятки секунд;
- организация производства разработанных приборов и изготовление на их базе различных систем магнитных измерений для действующих ускорительных комплексов и специализированных стендов.

Личный вклад автора

Личное участие автора в работах, составляющих основу диссертации, является определяющим. Им лично проведены теоретические исследования погрешностей цифрового интегрирования сигналов, структурных и схемотехнических решений приборов. Проведённые теоретические исследования и предложенные решения послужили основой для практической реализации этих решений. Участие автора было определяющим на этапе разработки и производства цифровых интеграторов. Он принял активное участие в создании измерительных стендов и систем, базирующихся на разработанных устройствах. При его определяющем участии реализован ряд способов магнитных измерений, использующих индукционный метод.

Научная новизна

1. Впервые проведено строгое теоретическое исследование современных цифровых методов интегрирования сигналов. Найдены причины и получены соотношения, определяющие методические погрешности цифрового интегрирования.
2. Предложены и исследованы теоретически и экспериментально структурные и схемотехнические решения цифровых интеграторов, определяющие принципиальные характеристики устройств: зависимость величины шума от времени интегрирования, линейность, абсолютную погрешность интегрирования, точность привязки по времени, стабильность нуля и масштаба.
3. Впервые изучены вопросы применимости радиоэлектронных элементов поверхностного монтажа в прецизионных устройствах и показаны причины, ограничивающие применение таких элементов.
4. Предложена оригинальная схема коммутации измерительных катушек в датчике для измерения магнитных линз, позволившая отказаться от дополнительных электронных устройств. Это решение

привело к снижению шумов измерительного тракта и в конечном итоге позволило получить недостижимое ранее как в отечественной, так и, по-видимому, в мировой практике качество измерения гармоник в магнитных линзах.

5. В результате теоретического анализа найдены способы минимизации уровня шума при больших временах интегрирования, достигающих десятков секунд.

Научная и практическая ценность работы

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования стали основой при разработке многофункциональных цифровых интеграторов VsDC2 и VsDC3 (Volt-second-to-Digital Convertor), выпущенных к настоящему времени Экспериментальным производством ИЯФ в заметных количествах. Созданные устройства по своим параметрам и системным возможностям не уступают аналогичным приборам ведущих приборостроительных компаний мира, а для многих видов измерений и превосходят их.

На базе изготовленных интеграторов создано несколько стендов для измерения характеристик импульсных и постоянных магнитов. Стенды применялись для исследования и серийного производства магнитных элементов канала К-500 и ВЭПП-2000 (ИЯФ), линз, дипольных магнитов и септум-магнитов комплекса NSLS-II (Brookhaven National Laboratory, США), линз для MAX IV LAB (Швеция), импульсных дипольных магнитов для источника СИ PETRA III (DESY, Германия).

Интеграторы применяются в стационарных системах контроля импульсных магнитов на комплексах ВЭПП-2000, ВЭПП-3 и в канале К-500 (ИЯФ), в каналах впуска/выпуска 3 ГэВ бустера в Brookhaven National Laboratory.

Полученный практический опыт использован при разработке интегрирующих измерителей для задающего генератора ВЧ-системы бустера комплекса NICA и в ряде других работ.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Теоретический анализ цифрового способа интегрирования сигналов, позволивший выявить причины методических погрешностей цифрового интегрирования и получить аналитические соотношения, описывающие эти погрешности.
2. Теоретический анализ и практические исследования структурных и схемотехнических решений цифровых интеграторов, в результате которых предложены оригинальные решения, позволившие созданной электронике достигнуть мирового уровня.
3. Комплекс созданных и активно применяемых систем магнитных измерений на основе индукционного метода как для внутренних работ

ИЯФ СО РАН, так и для ведущих ускорительных лабораторий мира.

4. Проведенный анализ и сформулированные на основе этого анализа предложения по способам минимизации уровня шума цифровых интеграторов при больших временах интегрирования.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск), на российских и международных научных конференциях: Russian Particle Accelerator Conference RuPAC'12 (Санкт-Петербург, Россия, 2012); The 4th International Particle Accelerator Conference, IPAC13 (Shanghai, China, 2013); Russian Particle Accelerator Conference RuPAC'14 (Обнинск, Россия, 2014). Результаты диссертационной работы опубликованы в трех реферируемых научных журналах.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка литературы из 56 наименований, изложена на 115 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков и 16 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проводится сравнение различных методик магнитных измерений, формулируются уникальные свойства индукционного метода, широко применяемого в измерениях магнитных полей в ускорительной технике. Обосновывается актуальность работ по совершенствованию аппаратуры для реализации этого метода, и отмечаются наиболее перспективные и активно развиваемые способы построения такой аппаратуры. Сформулированы основные цели диссертации и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится обзор и классификация различных способов измерения параметров поля магнитных элементов ускорителей с помощью индукционного метода. На основе этого анализа формулируются требования к современному поколению аппаратуры для таких измерений.

Задачи по измерению характеристик магнитных полей в элементах ускорителей, решаемые с помощью индукционного метода, можно сгруппировать в два больших класса: импульсные измерения и измерения параметров постоянных магнитных элементов.

Первый – это измерения полей, изменяющихся во времени по своей физической сути, причем длительности сигналов лежат в диапазоне от единиц

микросекунд до сотен миллисекунд. Аппаратура, применяемая для импульсных магнитных измерений, работает с сигналами большой амплитуды: десятки-сотни вольт, она должна обеспечивать относительный уровень шума ниже, чем 10^{-4} и точность привязки интервала интегрирования к внешним сигналам синхронизации не хуже 10 нс. Используются стационарные катушки, размещаемые в магнитах. Описываются две основных задачи: контроль стабильности поля в импульсных элементах действующих ускорителей и измерения, проводимые на этапе разработки и изготовления импульсных магнитов.

Второй класс – это измерения параметров поля постоянных магнитов. В измерениях применяются катушки различных конфигураций, перемещаемые определенным образом внутри магнита. Такое перемещение создает переменный магнитный поток, а по результатам интегрирования индукционного сигнала, снимаемого с катушки, и зная траекторию перемещения, можно определять необходимые параметры. Длительности измеряемых сигналов определяются временем механических перемещений и лежат в диапазоне от единиц до десятков секунд, амплитуды сигналов – 0,1 мкВ до 1 В, при этом шум интеграла для большинства методик не должен превосходить 10-100 нВ·с.

Далее в главе 1 описываются несколько возможных схем построения интегрирующих измерителей. На основе требований к точности для различных методик и анализа существующих решений формулируется набор параметров и концепция нового поколения универсальных интегрирующих приборов. Отмечается, что перспективным является метод цифрового интегрирования, при котором интеграл сигнала определяется суммой цифровых отсчетов АЦП, умноженных на временной интервал между ними. Такой подход можно называть прямым цифровым интегрированием. Далее отмечается, что метод прямого цифрового интегрирования обладает заметными ограничениями в случае импульсных измерений.

Во второй главе рассматриваются вопросы ограничения точности представления интеграла сигнала суммой цифровых отсчетов. Как известно, процедура получения цифровых отсчетов включает в себя операции дискретизации сигнала по времени и квантования по уровню.

Для анализа ограничений цифрового метода интегрирования, вызванных дискретизацией, предлагается воспользоваться спектральным представлением. Показано, что интеграл сигнала $f_{in}(t)$ совпадает с его спектральной компонентой $S_{in}(\omega)$ на нулевой частоте:

$$S_{in}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{in}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \Big|_{\omega=0} = \int_{-\infty}^{\infty} f_{in}(t) dt .$$

После дискретизации входного сигнала с частотой F_S спектральные компоненты на частотах, кратных F_S , окажутся неотличимы от спектральной

компоненты на нулевой частоте (рис.1), создавая ошибку определения интеграла δV_s . Проведённые в главе 2 выкладки позволяют получить аналитическое выражение для этой ошибки:

$$\delta V_s = 2 \operatorname{Re} \left(\sum_{k=1}^{+\infty} S_{in} \left(\frac{2\pi k}{T_s} \right) \right),$$

где в качестве $T_s = 1/F_s$ обозначен период дискретизации.

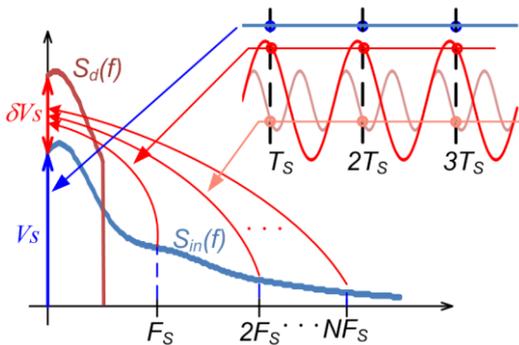


Рис.1. Возникновение ошибки цифрового метода интегрирования: компоненты спектра интегрируемого сигнала с частотами, кратными F_s , в результате дискретизации становятся неотличимы от нулевой компоненты и дают ошибку δV_s

В общем случае, если генератор частоты дискретизации F_s и интегрируемый сигнал несинхронизированы, то выявленная ошибка начинает носить статистический характер, оказывая прямое влияние на повторяемость (стабильность) измерений.

Для минимизации рассмотренной погрешности в тракте устройства следует иметь фильтр низких частот (ФНЧ), обеспечивающий необходимое подавление спектральных компонент сигнала на частоте F_s и выше.

Однако, ФНЧ, оставляя интеграл сигнала неизменным, искажает форму сигнала во временной области, что делает точную привязку интервала интегрирования к внешним импульсам синхронизации невозможным. Для обеспечения точных моментов синхронизации (измерения интеграла) в сигнальный тракт до ФНЧ необходимо добавить быстродействующий аналоговый ключ, выделяющий во времени только ту часть сигнала, которую необходимо проинтегрировать. Нетрудно заметить, что в подобной структуре в цепях после ключа и ФНЧ появляется возможность применить сравнительно медленный, точный, высокоразрядный АЦП. Таким образом, полная схема сигнального тракта многофункционального цифрового интегратора должна содержать три принципиальных элемента: быстродействующий аналоговый ключ, фильтр низких частот, высокоразрядный АЦП (рис.2). Интегрирование сигнала в такой структурной схеме разбивается на три фазы. До начала интегрирования ключ находится в положении Л. В момент старта интегрирования ключ переводится в положение Н, сигнал с входного

усилителя поступает на ФНЧ и затем – на АЦП, выборки которого суммируются и умножаются на T_S . В момент окончания интегрирования ключ снова переводится в положение L, однако, суммирование некоторого количества выборок АЦП продолжается (фаза до-интегрирования), для того, чтобы учесть процесс установления на выходе фильтра, содержащий часть информации об измеряемом интеграле сигнала.

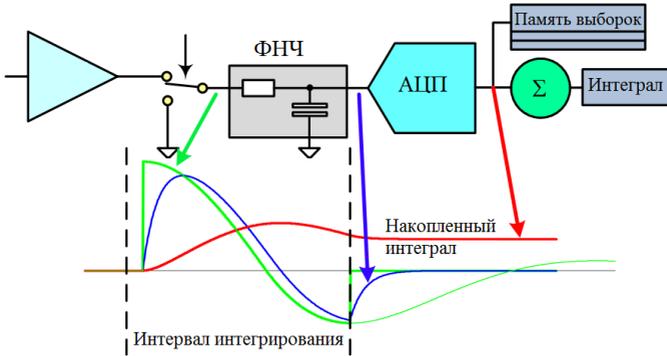


Рис.2. Структурная схема цифрового интегратора с точной синхронизацией и вид сигналов в разных точках схемы.

Далее в главе 2 рассматривается вклад в погрешность цифрового интегрирования ошибок, возникающих при преобразовании дискретных выборок в цифровой код. Эти погрешности можно разделить на систематические (ошибка нуля, масштаба, нелинейные искажения) и статистические, включающие в себя различные источники шума в тракте устройства и, собственно, процедуру квантования. В физических исследованиях повторяемость измерений, определяемая шумом, всегда является более важным параметром, чем ошибка масштаба или нелинейность. Поэтому особое внимание уделено анализу шума интегралов, чему посвящён второй раздел главы. Предположив, что шумовые выборки АЦП статистически независимы и имеют среднеквадратичное значение равное $\langle x_{ADC} \rangle$, шум интеграла в случае суммирования N отсчетов можно оценить как:

$$\langle V_S \rangle = \left\langle \sum_{k=1}^N (x(k) T_S) \right\rangle = (\langle x_{ADC} \rangle \sqrt{N}) T_S .$$

Данное выражение можно модифицировать, используя частоту преобразования F_S и выразив время интегрирования как $T_I = NT_S$:

$$\langle V_S \rangle = \frac{\langle x_{ADC} \rangle}{\sqrt{F_S}} \sqrt{T_I} = \eta_{ADC} \sqrt{T_I} .$$

В рассматриваемой модели относительный шум интеграла должен расти пропорционально корню от времени интегрирования, однако, как показали

эксперименты, поведение шума в реальных устройствах не соответствует рассмотренной закономерности.

Сделанное выше предположение о статистической независимости выборок АЦП эквивалентно тому, что спектральная плотность мощности шума равна константе. Однако, в электронных системах в низкочастотной области, как правило, доминирует шум, который ведет себя по закону, близкому к $1/f$. Проведённый далее в главе 2 анализ показывает, что наличие шума $1/f$ при больших временах T_i приводит к его линейному росту со временем интегрирования. Вдобавок к малости амплитуды полезных сигналов такой шум является серьезным ограничением точности измерений при больших временах интегрирования.

В третьей главе описываются структура, схемотехника и основные параметры цифровых интеграторов VsDC2 и VsDC3, в которых реализован рассмотренный ранее принцип цифрового интегрирования с точной синхронизацией. Интегратор VsDC2 выполнен в конструктиве Евромеханика с высотой 3U и имеет CAN Bus интерфейс, VsDC3 это 6U модуль с интерфейсом VME-64.

В обоих устройствах используется 24-х разрядный сигма-дельта АЦП с темпом выдачи отсчетов 3.2 мкс на выборку, они имеют схожую схемотехнику и функциональность. Интегратор VsDC3 является более поздней разработкой, устройство обладает меньшей величиной шума тракта, имеет дифференциальный вход и гальванически изолированный аналоговый тракт. У каждого прибора есть несколько входных диапазонов, цепи калибровки нуля и масштаба преобразования и развитая цифровая инфраструктура, выполняющая всю необходимую обработку отсчетов АЦП, вычисление интегралов и регистрацию осциллограмм входного сигнала. На рис.3 представлена величина типовой абсолютной ошибки интеграла при разных временах интегрирования.

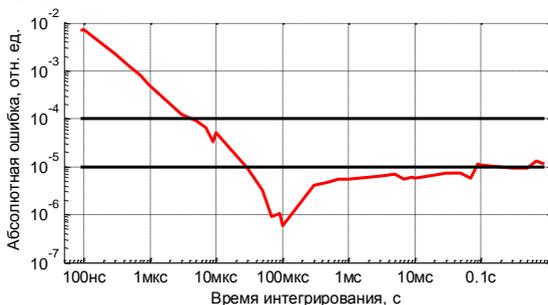


Рис.3. Ошибка интеграла относительно шкалы прибора в зависимости от времени интегрирования.

Заметим, что предложенная структура цифрового интегратора позволяет интегрировать сигналы с длительностью сравнимой и даже меньшей интервала между отсчётами АЦП. Систематическая ошибка интегрирования на временах до 100 мкс определяется неточностью соблюдения интервала интегрирования, который оказывается меньше заданного на 1-2 нс. При временах более 1 мс преобладают источники ошибок, связанные с погрешностью масштаба преобразования.

Один из эффектов, приводящих к таким ошибкам и описанным в главе 3, вызван дрейфом масштаба преобразования вследствие саморазогрева малогабаритных резисторов поверхностного монтажа в прецизионном преобразовательном тракте.

Важнейшей характеристикой интегрирующих устройств является шум интеграла в зависимости от времени интегрирования (см. рис.4).

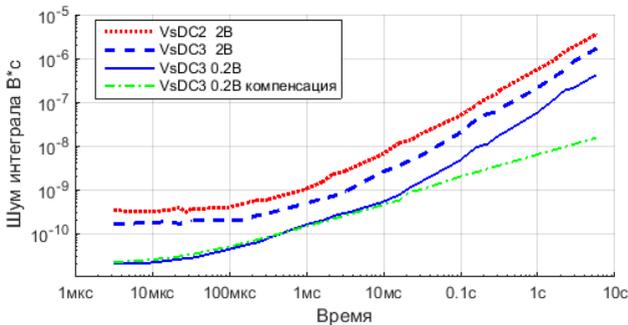


Рис.4. Зависимость шума интеграла от времени интегрирования для VsDC2 и VsDC3 на разных диапазонах.

При малых временах интегрирования шум практически постоянен и определяется фазой до-интегрирования. Для значений $T_i > 10$ мс шум растет прямо пропорционально времени. Зависимость шума интеграла от времени интегрирования с одной стороны показывает, какова будет предельная разрешающая способность измерительной системы, а с другой – является критерием для проектирования измерительных датчиков.

Коллегами автора, занимающимися магнитными измерениями ондуляторов в центре DESY в Гамбурге, было проведено сравнение нескольких моделей современных интегрирующих измерителей. Анализируется только одна, но важнейшая характеристика – зависимость шума от времени интегрирования (см. рис.5) В приводимых данных присутствует и один из описываемых приборов - VsDC3. На графиках, помимо модуля VsDC3, представлены данные на устройства ведущих приборостроительных компаний мира: прецизионный вольтметр HP3458A, нановольтметр Keithley 2182A, аналоговый интегратор Lake Shore 480. Также

показаны результаты, полученные для тестовых плат прецизионных АЦП ADS1282 (*Texas Instruments*) и AD7195 (*Analog Devices*).

Приведённые данные демонстрируют абсолютное превосходство VsDC3 вплоть до интервалов интегрирования 5 мс. При больших временах VsDC3 уступает только тестовым платам ADS1232REF и AD7195EBZ. Это обстоятельство стимулирует дальнейшее продолжение работ, направленных на поиски путей уменьшения шума созданных цифровых интеграторов до времён интегрирования 10÷20 секунд.

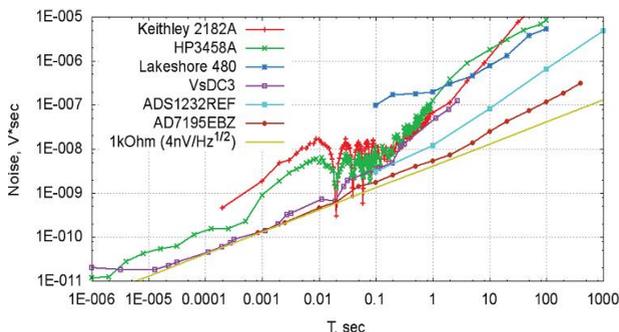


Рис.5. Шум интеграла в зависимости от времени интегрирования для различных моделей интегрирующих устройств.

В четвертой главе представлены примеры современных систем магнитных измерений на основе цифровых интеграторов VsDC2 и VsDC3. Первой рассматривается структура универсального стенда для измерения параметров импульсных магнитов на этапе их производства. В состав стенда входит четыре интегратора VsDC2, обеспечивающие восемь синхронно работающих измерительных каналов, универсальный контроллер источников питания SEAC124, система синхронизации на базе модулей DL200ME и Ф-16, а также система позиционирования индукционного датчика.

Стенд использовался при изготовлении дипольных магнитов с временем подъёма поля 300 мс и импульсных магнитов каналов впуска/выпуска 3 ГэВ бустера NSLS-II. В качестве примера на рис.6 показаны поперечное распределение интеграла поля для выпускного BUMP-магнита и шум измерительной системы. Из рисунка видно, что уровень шума составляет $1.25 \cdot 10^{-5}$. Далее рассматривается применение интеграторов VsDC2 и VsDC3 в составе стационарных систем контроля стабильности импульсного поля на ускорительных комплексах ВЭПП-2000 (ИЯФ СО РАН), 3 ГэВ бустера NSLS-II (BNL) и канале транспортировки частиц К-500 (ИЯФ СО РАН).

Одной из показательных работ, выполненных с помощью интегратора VsDC3 и рассматриваемых в главе 4, является система подавления пульсаций ведущего поля ВЭПП-4М (ИЯФ СОРАН) в диапазоне частот 0 – 50 Гц,

позволившая достигнуть уровня пульсаций и долговременной стабильности, близких к 10^{-7} .

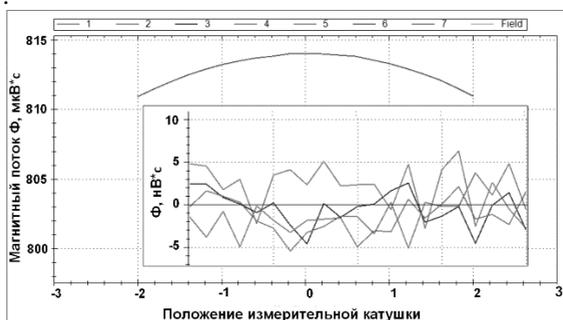


Рис.6. Результаты измерений BUMP-магнитов и шум измерительных каналов.

В последнем разделе главы описан стенд для измерения параметров мультиполюсных линз с постоянным полем. В стенде использован метод вращающихся катушек. Благодаря реализации измерений «на лету», без остановки вращения, применению индукционного датчика с компенсацией дипольной и квадрупольной компонент поля и использованию интеграторов VsDC3, достигнут рекордно низкий уровень шума измерения амплитуды гармоник поля (рис.7).



Рис.7. Шум измерительной системы и типовой уровень амплитуды гармоник.

В пятой главе обсуждаются пути улучшения параметров цифровых интеграторов, позволяющие существенно расширить возможности устройств в измерениях с временем интегрирования в десятки секунд. Как отмечалось в главе 1, требуемый шум интеграла при измерении магнитов с постоянным полем, находится в диапазоне 10 – 100 нВ·с. Из графика на рис.5 следует, что данное требование в описываемых интеграторах будет соблюдаться лишь до времён в несколько секунд.

В главе 2 показано, что при больших временах интегрирования определяющий вклад в шум интеграла вносит присущий аналоговому тракту

шум вида $1/f$. Такой шум принято характеризовать частотой среза f_c , при которой спектральная мощность шума $1/f$ сравнивается со спектральной мощностью широкополосного шума η_{ADC}^2 . При таком определении f_c для спектральной мощности шума выборки S_{ADC}^2 можно написать:

$$S_{ADC}^2(f) = \eta_{ADC}^2 \left(1 + \left(\frac{f_c}{f} \right) \right).$$

Из интуитивных соображений можно предположить, что процедура измерения и вычитания смещения нуля интегратора, выполняемая с необходимой периодичностью, может существенно подавить вклад от $1/f$ шума. Далее в главе 5 показано, что наличие в тракте устройства $1/f$ шума дает при интегрировании и предшествующей ему калибровке смещения нуля в течение времени T такое выражение для шума интеграла:

$$\langle V_S(T) \rangle^2 = 2\eta_{ADC}^2 T + 8\ln(2)\eta_{ADC}^2 f_c T^2.$$

Первое слагаемое соответствует вкладу от широкополосного шума для удвоенного времени интегрирования, что естественно, поскольку к шуму процедуры интегрирования добавился вклад шума во время калибровки. Второе слагаемое показывает вклад от $1/f$ шума. Причем второе слагаемое сравнивается с первым при времени интегрирования, равного: $T_C = 1/(4\ln(2)f_c)$.

Если интервал интегрирования T разбить на $2*N$ отрезков длительностью T_C , состоящих из чередующихся калибровок и интегрирований, то вклад от шума $1/f$ окажется существенно подавлен. Для реализации такого режима работы необходимо объединить входы двух каналов интегратора и чередовать интегрирование с измерением собственного смещения нуля в них, схема объединения каналов приведена на рис. 8.

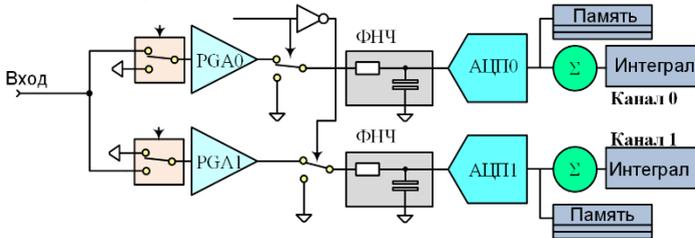


Рис. 8. Схема прибора для компенсации $1/f$ шума.

Шум интеграла для такой схемы интегрирования окажется пропорционален корню от времени интегрирования:

$$\langle V_S(T) \rangle = \sqrt{2\eta_{ADC}^2 T + 8f_c T_C \alpha(N) \eta_{ADC}^2 T},$$

причем $\alpha(N) \leq \ln(2)$. Если теперь подставить выражение для T_C , то для шума интеграла с процедурой чередования можно получить следующую оценку:

$$\langle V_s(T) \rangle \leq 2\eta_{ADC} \sqrt{T} .$$

Экспериментально измеренная плотность шума аналогового тракта для интегратора VsDC3 на диапазоне ± 200 мВ составляет $\eta_{ADC} = 4,5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, а время $T_C = 18$ мс. На рис.4 штрихпунктирная линия показывает расчетную зависимость шума интеграла с компенсацией и учетом фазы до-интегрирования в сравнении с исходными кривыми шума интеграторов VsDC2 и VsDC3.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы, состоящие в следующем:

1. Проведено строгое теоретическое исследование цифрового метода интегрирования сигналов. Найдены причины и получены соотношения, определяющие методические погрешности цифрового интегрирования.
2. Предложены и исследованы теоретически и экспериментально схемотехнические и структурные решения цифровых интеграторов, определяющие принципиальные характеристики устройств: зависимость величины шума от времени интегрирования, линейность, абсолютную погрешность интегрирования, точность привязки по времени, стабильность нуля и масштаба.
3. Изучены вопросы применимости радиоэлектронных элементов поверхностного монтажа в прецизионных устройствах и исследованы причины, ограничивающие применение таких элементов.
4. Создан комплекс систем магнитных измерений на основе индукционного метода как для внутренних работ ИЯФ СО РАН, так и для ведущих ускорительных центров мира.
5. В результате теоретического анализа найдены способы минимизации уровня шума при больших временах интегрирования, достигающих десятков секунд.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. А.М. Батраков, И.В. Ильин, А.В. Павленко. Прецизионные цифровые интеграторы сигналов с точной синхронизацией. // Автометрия. - 2015. - Т.51, N1. - С.62-69.
2. А.М. Батраков, П.Д. Воблый, Д.С. Гуров, В.В. Зуев, В.В. Кобец, Н.Б. Нефёдов, А.Б. Огурцов, А.В. Павленко, А.В. Уткин, А.В. Филипченко. Мультипольные электромагниты для бустера BNL (США) и линака MAX IV LAB (Швеция). // Вестник РАН. Сер.: физика. - 2015. – Т.79, N1. – С.44-48
3. D.A. Starostenko, P.V. Logachev, A.V. Akimov, A.A. Korepanov, P.A. Bak, A.N. Panov, A.A. Pachkov, A.A. Eliseev, A.V. Ottmar, Ya.V. Kulenko,

- D.Yu. Bolkhovityanov, G.A. Fatkin, O.A. Pavlov, G.I. Kuznetsov, I.V. Nikolaev, M.A. Batazova, A.M. Batrakov, Yu.M. Boimelshtein, and A.V. Pavlenko. Results of Operating LIA_2 in Radiograph Mode // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2014, Vol. 11, No. 5, pp. 660–664.
4. А.М. Батраков, П.В. Вагин, И.В. Ильин, А.В. Павленко, Д.С. Шичков. Прецизионные многофункциональные интеграторы VsDC2 и VsDC3, Препринт ИЯФ 2012-31, 25р. - Новосибирск, 2012 http://www.inp.nsk.su/activity/preprints/files/2012_031.pdf
 5. A.S. Tsuganov, A.M. Batrakov, E.S. Kazantseva, A.V. Pavlenko, T.V. Rybitskaya, B.A. Skarbo, D.S. Shichkov, A.A. Starostenko, P.D. Vobly. Stand for precise measurements of magnetic lenses field quality [Electronic resource]. // XXIII Russian Particle Accelerator Conference: RuPAC'2012, Sept. 24 - 28, 2012, Saint-Petersburg, Russia: Proc. - Saint-Petersburg, 2012. - p.495. <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/rupac2012/papers/weppc022.pdf>
 6. A.N. Zhuravlev, A.M. Batrakov, A.D. Chernyakin, V.A. Kiselev, V.M. Konstantinov, A.V. Pavlenko, V.V. Petrov, E.P. Semenov, D.V. Senkov. Pulsed magnets for injection and extraction sections of NSLS-II 3 GeV booster [Electronic resource]. // The 4th International Particle Accelerator Conference: IPAC'13, May 12 - 17, 2013, Shanghai, China: Proceedings - p.3582 <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2013/papers/thpme033.pdf>
 7. I.N.Okunev, V.V. Kobets, A.M. Batrakov, A.V. Pavlenko, S.V. Sinyatkin, V.A. Kiselev, G.N. Baranov, A.I. Erokhin, R.V. Vakhrushev. Ramped magnetic measurement of NSLS-II booster dipoles [Electronic resource]. // The 4th International Particle Accelerator Conference: IPAC'13, May 12 - 17, 2013, Shanghai, China: Proceedings - p.3576 <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2013/papers/thpme031.pdf>
 8. A.V. Pavlenko, A.M. Batrakov, I.V. Ilyin. Electronics for precise measurements of accelerator pulsed magnets [Electronic resource]. // The 4th International Particle Accelerator Conference: IPAC'13, May 12 - 17, 2013, Shanghai, China: Proceedings - p.3216 <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2013/papers/thpea033.pdf>
 9. A.M. Batrakov, A.D. Chernyakin, V.A. Kiselev, A.V. Pavlenko, D.V. Senkov, A.N. Zhuravlev. Pulse generators for septums and bumps of injection and extraction systems NSLS-II 3 GeV booster [Electronic resource]. // The 4th International Particle Accelerator Conference: IPAC'13, May 12 - 17, 2013, Shanghai, China: Proceedings - p.726 <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2013/papers/mopwa029.pdf>
 10. A.V. Pavlenko, A.M. Batrakov, G.V. Karpov, I.B. Nikolaev, V.V. Svishchev. Method of broadband stabilization of the VEPP-4 main field [Electronic resource]. // XXIV Russian Particle Accelerator Conference: RuPAC'2014, Obninsk, Kaluga Region, Russia, 2014; p.100-102 <http://epaper.kek.jp/rupac2014/papers/tupsa29.pdf>

ПАВЛЕНКО Антон Владимирович

Многофункциональные цифровые интеграторы для прецизионных магнитных измерений элементов ускорителей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сдано в набор

Подписано в печать

Формат 60x90 1/16. Объем печ.л., уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ №

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11