

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Павленко Антона Владимировича
«МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЦИФРОВЫЕ ИНТЕГРАТОРЫ ДЛЯ
ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ЭЛЕМЕНТАХ
УСКОРИТЕЛЕЙ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.20 (Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника).

Научно-квалификационная работа Павленко Антона Владимировича посвящена решению задачи, имеющей существенное значение для ускорительной техники, где применяется множество различных магнитных элементов: поворотные магниты, линзы, корректоры, вигглеры. Значения магнитных полей находятся в диапазоне от 0.1 Тл до 10 Тл. Распределение магнитного поля в этих элементах, его зависимость от времени и стабильность являются определяющими факторами для работы электронно-оптического тракта, причём с развитием ускорительной техники требования к характеристикам становятся всё более жёсткими. В настоящее время зачастую требуется обеспечить измерение характеристик магнитного поля с точностью близкой к 10^{-5} .

Известны различные способы измерений магнитных полей: с помощью СКВИД датчиков, датчиков Холла, ЯМР и индукционных датчиков. Широкое применение для верификации параметров магнитных элементов на этапах разработки и производства, а также контроля в текущей эксплуатации получили методы измерения на основе индукционных датчиков. Эти датчики позволяют измерять импульсные и квазистационарные магнитные поля в широком диапазоне и с высокой точностью. Индукционные измерения требуют соответствующих по параметрам интегрирующих измерителей. Разработкам подобных измерителей, основанных на современном методе цифрового интегрирования, и посвящена диссертационная работа. В связи с вышеизложенным, работа Павленко А. В. несомненно **актуальна**.

Цели диссертационной работы заключались в следующем:

- проведении детального теоретического анализа и экспериментальных исследований метода цифрового интегрирования, и его дальнейшее развитие на основе этих исследований;
- разработке 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;

- организации производства разработанных приборов и изготовления на их базе различных систем магнитных измерений для действующих ускорительных комплексов и специализированных стендов.

Достоверность полученных результатов подтверждается достаточным количеством публикаций, а также успешным применением разработанных автором устройств в стендах для измерения импульсных и постоянных магнитов и в стационарных системах контроля импульсных магнитов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

Проведено строгое теоретическое исследование современных цифровых методов интегрирования сигналов. Найдены причины и впервые получены соотношения, определяющие методические погрешности цифрового интегрирования.

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.

Впервые изучены вопросы применимости радиоэлектронных элементов поверхностного монтажа в прецизионных устройствах и показаны причины, ограничивающие применение таких элементов.

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 высокое качество измерения гармоник в магнитных линзах.

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

Практическая значимость работы

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования стали основой при разработке многофункциональных цифровых интеграторов VsDC2 и VsDC3 (Volt-second-to-Digital Converter), 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.

Структура работы

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.

Материал изложен автором следующим образом.

Во введении проводится сравнение различных методик магнитных измерений, формулируются особенности индукционного метода, широко применяемого в измерениях магнитных полей в ускорительной технике, автор обосновывает актуальность диссертационной работы, формулирует цели диссертационной работы и приводит положения, выносимые на защиту.

В первой главе автором проводится обзор различных способов измерения параметров поля магнитных элементов ускорителей с помощью индукционного метода. Автор разделяет эти способы на два класса: импульсные измерения и измерения постоянных полей.

Для измерения импульсных магнитных полей применяются стационарные катушки, размещаемые непосредственно в магнитах. Длительность сигналов, с которыми приходится иметь дело, лежит в диапазоне от единиц микросекунд до сотен миллисекунд, а амплитуды составляют десятки, а иногда и сотни вольт, при этом требуется обеспечить относительный уровень шума не хуже 10^{-4} , а точность синхронизации должна быть около 10 нс. Основными задачами, которые

решаются таким образом, это измерения, проводимые на этапе разработки импульсных магнитов, и контроль стабильности поля в импульсных элементах действующих ускорителей.

Для измерения параметров поля постоянных магнитов применяются катушки различных конфигураций, перемещаемые внутри магнита таким образом, чтобы создавать переменный магнитный поток, по результатам интегрирования которого, зная траекторию перемещения, можно определять необходимые параметры. Длительности измеряемых сигналов в этом случае определяются временем механических перемещений и лежат в диапазоне от единиц до десятков секунд, а амплитуды сигналов от 100 нВ до единиц вольт, при этом шум интеграла для большинства методик не должен превосходить 10 – 100 нВ·с.

В конце этой главы автор рассматривает существующие схемы построения интегрирующих измерителей, после чего формулирует концепцию и набор параметров разрабатываемых им интегрирующих приборов.

Во второй главе приводится теоретическое рассмотрение схемы цифрового интегрирования с точной синхронизацией. Целью автора является определение теоретически достижимых пределов точности этого метода. Первыми анализируются ограничения, вызванные дискретизацией, для чего применяется спектральное представление сигнала. В частности, автор пользуется тем фактом, что интеграл сигнала совпадает с его нулевой спектральной компонентой. Он выводит выражение для величины такой ошибки и обосновывает необходимость применения фильтра низких частот, для того, чтобы минимизировать её. Автор показывает, что фильтр низких частот оставляет интеграл сигнала неизменным, искажая лишь его форму во временной области. Для обеспечения точной синхронизации, предлагается добавить в измерительный тракт быстродействующий аналоговый ключ. При этом из-за «растяжения» сигнала по времени за счёт ФНЧ становится возможным применять точный высокоразрядный, но сравнительно медленный АЦП.

Автор рассматривает процесс интегрирования сигнала в получившейся схеме, состоящей из ключа, ФНЧ и АЦП, разбивая его на 3 фазы: подготовительную фазу (до начала интегрирования), фазу интегрирования, начинающуюся после замыкания ключа, и фазу до-интегрирования «растянутого» временного сигнала, после размыкания ключа.

В дальнейшем рассмотрении ошибки, возникающие при преобразовании дискретных выборок в цифровой код, автор разбивает на систематические (ошибка нуля, масштаба, нелинейные искажения) и статистические, включающие в себя различные источники шума в тракте устройства и шум квантования. Кратко рассмотрев систематические ошибки, автор подробно анализирует шум интеграла, который оказывает решающее влияние на повторяемость результатов измерений. Он теоретически обосновывает экспериментальный факт линейного роста шума интеграла при больших временах интегрирования.

В третьей главе автор описывает разработанные им цифровые интеграторы VsDC2 и VsDC3, приводит их механические и электрические характеристики. Также автор рассматривает применяемые схемотехнические решения.

Интересным наблюдением является то, что существенную ошибку в прецизионных измерениях вызывает изменение температуры малогабаритных резисторов поверхностного монтажа вследствие протекания по ним импульса относительно малого тока.

Далее автор приводит весьма показательное сравнение зависимости шума интегрирования от времени для различных измерительных устройств, проведённое в центре DESY (Германия). Результат сравнения демонстрирует, что разработки диссертанта показывают наилучшие результаты в наиболее важном диапазоне времён интегрирования.

В четвертой главе автор описывает применение разработанных им цифровых интеграторов в системах магнитных измерений. На стенде для измерения параметров импульсных магнитов было применено четыре интегратора VsDC2, и удалось достичь уровня шума порядка 10^{-5} . Также рассматривается применение интеграторов на комплексах ВЭПП-2000 (ИЯФ СО РАН), бустере NSLS-II (BNL) и канале транспортировки частиц К-500 (ИЯФ СО РАН) для контроля стабильности импульсного поля.

Приводится интересный пример системы подавления пульсаций поля ВЭПП-4М (ИЯФ СО РАН), с помощью которой удалось достигнуть уровня пульсаций близких к 10^{-7} . В конце главы описывается стенд для измерения параметров мультипольных линз, в котором используются вращающиеся катушки, в этом стенде с использованием разработок автора удалось достичь шума гармоник близкого к $5 \cdot 10^{-7}$ относительно основной.

В пятой главе диссертант обсуждает способы улучшения параметров цифровых интеграторов при больших временах интегрирования. Он предлагает оригинальную схему с использованием двух каналов интегратора, работающих попеременно таким образом, что когда один измеряет сигнал, второй проводит измерение собственного смещения нуля и калибровку. Автор приводит теоретические предпосылки для применения такой схемы, а также предварительные экспериментальные данные, показывающие, что такой метод весьма перспективен.

В заключении формулируются основные результаты диссертационной работы.

Представленная работа несомненно является добротным трудом, сочетающим глубокое теоретическое рассмотрение представленных вопросов и ценную практическую реализацию. В то же время, хотелось бы сделать **ряд замечаний**.

В тексте диссертации автор неоднократно полемизирует с диссертационной работой своего руководителя, при этом даёт отсылки к этой работе, не приводя цитат, что значительно усложняет чтение работы.

В главе 2 автор приводит теоретические расчёты погрешностей цифрового интегрирования, однако никоим образом не рассматривает вопрос оптимального времени до-интегрирования. Из приведённых выкладок понятно, что такое время должно существовать, определяясь с одной стороны ростом шума со временем, а с другой – ошибкой, вносимой ограничением времени интегрирования переходного процесса фильтра.

Подписи к ряду рисунков выполнены на русском, а к некоторым — на английском языке.

В разделе 1.3 при рассмотрении методов интегрирования почему-то совершенно не обсуждаются обычные аналоговые интеграторы, и в целом обзор ограничивается всего тремя приборами. В разделе 3.3 уместным было бы привести сводную сравнительную таблицу характеристик приборов ведущих производителей и разработанных автором.

На рис. 4.23 левая шкала очень неудобна для восприятия, лучше было бы привести степени 10 или дБ.

В заключение хочу отметить, что разработанная аппаратура нашла широкое применение в Институте ядерной физики и зарубежных ускорительных лабораториях. Теоретические результаты могут быть использованы при проектировании новых интегрирующих измерителей.

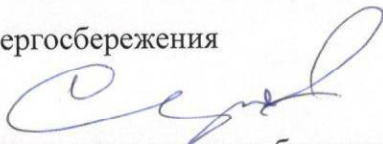
В заключение хочу отметить, что разработанная аппаратура нашла широкое применение в Институте ядерной физики и зарубежных ускорительных лабораториях. Теоретические результаты могут быть использованы при проектировании новых интегрирующих измерителей.

Диссертация представляет собой законченную и хорошо оформленную работу. Материал изложен ясным, профессиональным языком. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации, ее основным идеям и выводам. Результаты защищаемой работы опубликованы в научных журналах, докладах и трудах различных конференций.

Несмотря на сделанные критические замечания, диссертация Павленко Антона Владимировича «МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЦИФРОВЫЕ ИНТЕГРАТОРЫ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ЭЛЕМЕНТАХ УСКОРИТЕЛЕЙ» соответствует требованиям Положения о порядке присуждения научным работникам ученых степеней, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.20 (Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника).

Официальный оппонент:

Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории проблем энергосбережения



Серов Анатолий Федорович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук,
630090, РФ, г. Новосибирск-90. пр. Лаврентьева, 1
email: serov@itp.nsc.ru

Подпись заверяю:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

08 мая 2015 г.



д.ф.-м.н. Куйбин Павел Анатольевич