

Тесламетр динамических полей

А.И. Вагин, Б.А. Макаров, В.Г. Рыжов, О.Н. Поминов
Московский радиотехнический институт РАН, Москва, Россия

Эффективное функционирование современных электрофизических комплексов, например циклических ускорителей и накопительных колец заряженных частиц, невозможно без прецизионного контроля действующих в них магнитных полей [1,2]. Одними из наиболее точных средств измерения магнитной индукции являются тесламетры, работа которых основана на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [3]. Существенно большую погрешность имеют эти приборы при измерении быстропеременных магнитных полей, действующих, например, в синхротронах [4,5]. Снижение точности измерений динамических полей обусловлено рядом факторов [4,6], основные из которых рассмотрены ниже.

В статических полях сигнал магнитного резонанса представляет собой колоколообразный импульс, в центре которого магнитная индукция определяется по формуле

$$B_0 = 2\pi f_0 / \gamma, \quad (1)$$

где f_0 – рабочая частота магнитометра; γ – гиромагнитное отношение резонирующих ядер [6].

В реальных условиях сигналы магнитного резонанса, как правило, сравнимы по величине с шумом электронной схемы, поэтому в устройствах ЯМР применяют малошумящие входные каскады, компенсационные мостовые схемы, оптимальные фильтры, используют метод статистического усреднения шумов при многократном прохождении (накоплении) сигнала ЯМР [6]. В случае точных измерений постоянных полей применяют двойную модуляцию магнитного поля или рабочей частоты, сужают полосу пропускания измерительного тракта [6,7]. Однако большинство из этих подходов неприменимы в быстропеременных магнитных полях [4].

В динамических полях происходит дополнительная трансформация формы сигнала ЯМР: уменьшается амплитуда, сигнал уширяется, преобразуется в асимметричный, появляются “вигли”, происходит динамическое смещение. К систематическим погрешностям относят также запаздывание сигнала в радиотехническом тракте, экранирующий сдвиг от вихревых токов и т.д. Величина перечисленных эффектов возрастает с ростом скорости изменения поля [4, 6].

Предлагаемый тесламетр динамических полей является дальнейшим развитием устройств, описанных в работах [2,4]. Прибор состоит из преобразователя ядерного магнитного резонанса с блоками предусилителя и приемо-передатчика и дополнительного преобразователя с электронным блоком, управляемого блока амплитудно-временной селекции, оптимального перестраиваемого нелинейного фильтра, блока управления и обработки (рис.1). Дополнительный преобразователь имеет непрерывную характеристику выходной величины Y (напряжение, ток, частота и т.д.) от изменения величины магнитной индукции, т.е. $Y = f(B)$, где $f(B)$ – непрерывная функция.

Введение дополнительного преобразователя и вышеперечисленных блоков позволяет обеспечить выполнение следующих функций:

- непрерывно отслеживать широкий диапазон изменения магнитной индукции;
- контролировать и управлять рабочей частотой блока приемо-передатчика и, таким образом, определять измеряемое статическое поле по формуле (1);
- измерять скорость изменения B в любой момент времени и вычислять поправку на динамический сдвиг сигнала магнитного резонанса ΔB согласно соотношению

$$\Delta B = \sqrt{\dot{B}/\gamma} \quad (2)$$

и другие систематические погрешности [4];

- эффективно управлять блоком амплитудно-временной селекции;
- перестраивать полосу пропускания нелинейного фильтра в зависимости от величины скорости изменения магнитного поля.

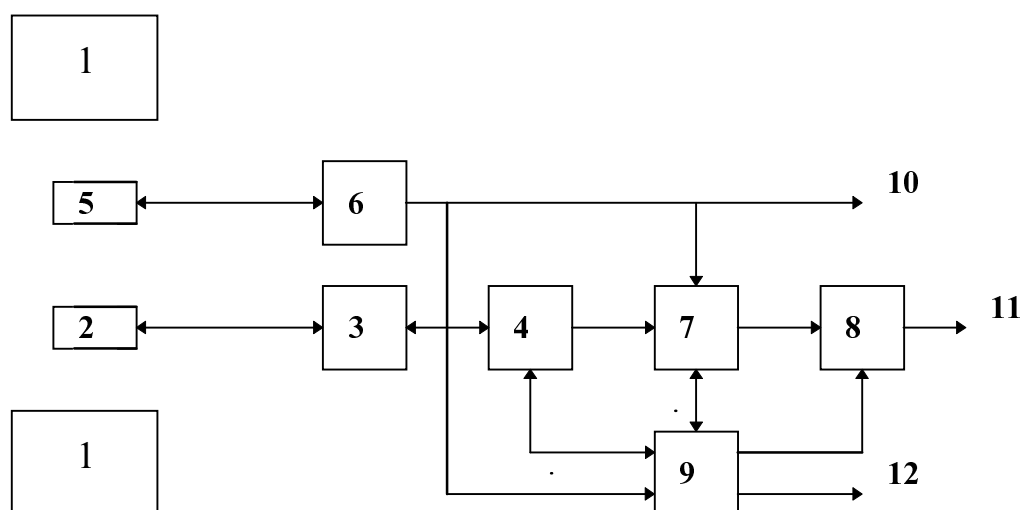


Рис.1. *Функциональная схема тесламетра динамических полей.*

1 – полюса электромагнита, 2 – преобразователь ЯМР, 3 – выносной блок предусилителя сигналов магнитного резонанса, 4 – блок приемо-передатчика, 5 – дополнительный преобразователь с непрерывной характеристикой, 6 – электронный блок, 7 – управляемый блок амплитудно-временной селекции, 8 – нелинейный перестраиваемый фильтр, 9 – блок управления и обработки, 10 – широкополосный выход, 11 – выход on line, 12 – выход off line.

Магнитометры ЯМР постоянных полей, как правило, выполняют по схеме генератора слабых колебаний (автодина). Эти генераторы легко перестраиваются в широком диапазоне частот, обладают хорошей чувствительностью [3,6,7]. С целью эффективного применения метода ЯМР для измерения индукции динамических полей экспериментально изучена и проанализирована работа автодинной и мостовой схем. В качестве радиотехнического моста использовали параллельный колебательный контур. В случае тестирования динамических полей исследования показали преимущества мостовой схемы. Автодинная схема имеет в этих условиях

ряд недостатков: обладает повышенной чувствительностью к внешним помехам, а также низкой стабильностью амплитуды и частоты [6, 7].

В работе проведен анализ возможных вариантов построения отдельных узлов мостовой схемы. Отметим, что в технике ЯМР известны радиотехнические мостовые схемы (мост Бломбергера-Парселла-Паунда, одинарный и двойной Т-образные мосты, дифференциальный мост Пейка и т. д.), с помощью которых проводится компенсация когерентных шумов передатчика. Тем не менее они не нашли широкого применения, так как высокочастотные мосты чувствительны к микрофонному эффекту, изменениям температуры и т. д. Кроме того, при полной компенсации ВЧ-несущей на выходе моста будет выделяться сумма сигналов ЯМР-поглощения и ЯМР-дисперсии. Для последующего разделения этих сигналов требуется значительное усложнение радиотехнического тракта, поэтому простейшая мостовая схема – параллельный резонансный контур – часто используется в устройствах ЯМР [1, 2, 5, 6].

В разработанном тесламетре применен оригинальный выносной блок предусилителя (ВВП) сигналов магнитного резонанса, свободный от перечисленных недостатков [8]. В этом блоке компенсация шумов передатчика происходит после детектирования сигнала ЯМР, в НЧ-тракте отсутствуют резонансные контуры, поэтому предусилитель имеет низкую чувствительность к действию внешних факторов. ВВП характеризуется также низким уровнем собственного шума: источник питания выполнен на пассивных элементах, и применены ВЧ-конденсаторы, имеющие малый уровень токов утечки. Предлагаемое устройство обладает повышенной защищенностью к действию внешних помех, так как на его входе отсекаются все частоты вплоть до частоты магнитного резонанса и ВЧ-конденсаторы модуля имеют небольшие собственные значения индуктивности [9]. Применение разработанного устройства позволяет увеличить отношение сигнал/шум не менее, чем на 10 – 15 дБ.

В магнитометре осуществлен принцип нелинейной фильтрации, позволяющий отделять интенсивные помехи, спектр которых частично перекрывается со спектром сигнала магнитного резонанса.

В приборе применен бинарный фильтр, выполненный на логических элементах [10]. Работа фильтра основана на временной селекции входных сигналов. Устройство нечувствительно к помехам большой амплитуды, но малой длительности. Фильтр отличается простотой программной перестройки полосы пропускания с использованием стандартных средств цифровой техники. Это обстоятельство позволяет обеспечить выполнение условий оптимальной фильтрации сигнала ЯМР при различных скоростях изменения магнитного поля.

В разработанном тесламетре в качестве дополнительного преобразователя магнитной индукции применен датчик Холла, величина выходного напряжения U с которого определяется формулой

$$U = k I B, \quad (3)$$

где k – коэффициент, I – управляющий ток, B – магнитная индукция [3]. В приборе применен преобразователь типа ПХЭ 602 118 А с магнитной чувствительностью ~ 100 мВ/Тл при токе управления $I = 100$ мА и температурном коэффициенте чувствительности не более $0,0001$ 1/К. Датчик и электронный блок помещены в термостаты, точность поддержания температуры в которых на уровне 313 – 318 К не превышает $0,1$ К. По непрерывному выходу (преобразователю Холла) устройство обеспечивает измерение магнитной индукции в диапазоне $0,01$ – 6 Тл.

Прибор испытан на магнитном стенде при $B = 0,9$ Тл, $\dot{B} = 0,5$ Тл/с и градиенте магнитного поля $\sim 0,02\%$ см⁻¹. Стабильность скорости изменения поля $\sim 1\%$. Погрешность измерения индукции датчиком Холла не хуже $0,03\%$.

Относительная погрешность измерения (стабильность привязки) по сигналу ЯМР при тех же параметрах не превышает $0,005\%$, абсолютная погрешность измерения величины магнитной индукции $\sim 0,01\%$.

При помощи 8 сменных протонных датчиков магнитная индукция измеряется по сигналу магнитного резонанса в диапазоне $0,04 - 2,7$ Тл. При использовании ядер с меньшим значением гиромагнитного отношения дейтерия – лития возможно значительное увеличение верхней границы измеряемых полей.

Таким образом, с помощью разработанного прибора контролируют значения магнитной индукции и скорость ее изменения в широком диапазоне быстропеременных полей, проводят прецизионные измерения абсолютной величины индукции и относительного ее значения в определенных точках поля и оценивают величину систематической погрешности. Прибор может быть использован для калибровки непосредственно в динамическом поле преобразователей Холла, магниторезистивных, феррозондовых и т. д., в системе управления инжекцией протонного пучка в первую ступень УНК.

Литература

1. Borer K. The nuclear magnetic resonance system for the CERN muon storage ring. Nuclear Instr. and Meth., 1977, v. 143, No 2, p.203 - 208.
2. Макаров Б.А., Поминов О.Н., Рыжов В.Г. ЯМР - магнитометр динамических полей. – Научно-технический сборник. Автоматизация научных исследований на электрофизических установках. Москва, 1989, с. 66 -73.
3. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хорев В.Н. и др. Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия, Ленингр. отделение, 1979, 320 с.
4. Рубчинский С.М., Зельдович М.П., Курочкин С.С. Об измерении мгновенных значений напряженности изменяющихся магнитных полей. Радиотехника и электроника, 1956, т.1, №7, с. 1001 - 1013.
5. Гуров Г.Г. Репер магнитного поля. Приборы и техника эксперимента, 1975, №3, с. 169 -170.
6. Леше А. Ядерная индукция. – М.: ИЛ, 1963, 684 с.
7. Васильев Л.В., Денисов Ю.Н., Ивашкевич С.А., Шишлянников П.Т. Ядерные магнитометры с улучшенным отношением сигнал/шум. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., 1970, ВИНТИ, т.1, с.651 - 655.
8. Лаврентьев В.И., Рыжов В.Г., Поминов О.Н. А.С. № 1410651 - Оpubл. в БИ, 1990, №34, с. 282.
9. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. М.: Мир, 1979, 317 с.
10. Макаров Б.А., Морозова Л.И., Рыжов В.Г. и др. А.С. № 1647480 - Оpubл. в БИ, 1991, № 17, с. 160.

