

## Модуль предусилителя сигналов магнитного резонанса

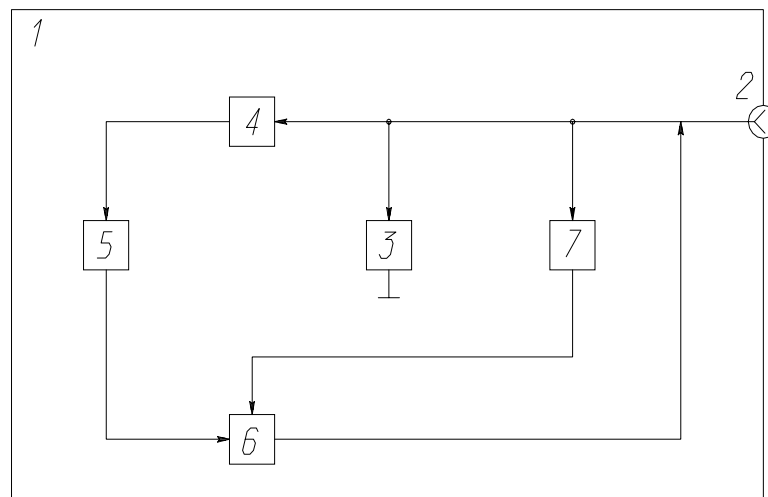
А.И. Вагин, Б.А. Макаров, В.Г. Рыжов  
Федеральное Государственное унитарное предприятие  
«Московский радиотехнический институт РАН», Россия

Одна из центральных проблем техники магнитного резонанса – увеличение чувствительности и повышение помехоустойчивости аппаратуры. Эта проблема обусловлена малой величиной сигнала, который наводится в датчике – катушке индуктивности радиочастотного колебательного контура – прецессирующим магнитным моментом [1].

Основными элементами радиотехнического тракта приборов ядерного магнитного резонанса (ЯМР) являются датчик, приемо-передатчик и выносной модуль предусилителя сигналов магнитного резонанса, от качества работы которого зависит точность измерения параметров сигнала ЯМР быстропротекающих процессов или индукции изменяющихся магнитных полей, а также общее время измерения (с применением метода накопления полезного сигнала или синхронного детектирования) стабильных состояний веществ, стационарных полей или периодических процессов [1-3].

В технике ЯМР известны радиотехнические мостовые схемы (мост Бломбергера-Парсела-Паунда, Т-образный мост, двойной Т-образный мост, дифференциальный мост Пейка и т.д.), с помощью которых производится компенсация когерентных шумов передатчика. Тем не менее они не нашли широкого применения по нескольким причинам. Во-первых, если мост полностью сбалансирован, то на выход его будет проходить только сигнал магнитного резонанса  $V$ , который будет представлять собой аддитивную сумму сигналов поглощения  $V_p$  и дисперсии  $V_d$ . Для того, чтобы затем разделить эти сигналы, необходимо их усилить, применить фазочувствительное детектирование, т.е. значительно усложнить схему устройства. Поэтому обычно применяют радиотехнические мосты слегка разбалансированными. В этом случае нет полной компенсации высокой частоты, но вследствие специфических свойств мостов можно выделить либо сигнал поглощения  $V_p$ , либо сигнал дисперсии  $V_d$ . Вторым недостатком заключается в том, что высокочастотные мостовые схемы чувствительны к внешним воздействиям – микрофонному эффекту, изменениям температуры и т.д. [1,2].

С целью увеличения отношения сигнал/шум (с/ш) и помехоустойчивости предложено оригинальное схемотехническое построение выносного модуля предусилителя (ВМП) мостовых устройств магнитного резонанса непрерывного типа [3]. ВМП состоит из корпуса 1, разъема соединения с приемо-передатчиком 2, резистора нагрузки 3, импеданса связи 4, моста 5, предусилителя 6 и блока питания предусилителя 7 (рис.1). Отличие от известных устройств [5,6] состоит в том, что в модуль дополнительно введен источник питания предусилителя 7, выполненный из пассивных элементов.



**Рис.1.** Функциональная схема выносного модуля предусилителя: 1 – корпус выносного модуля, 2 – разъем соединения с приемо-передатчиком, 3 – резистор нагрузки, 4 – импеданс связи, 5 – блок моста, 6 – блок предусилителя, 7 – блок питания предусилителя.

Схема функционирует следующим образом. ВЧ-напряжение частоты  $f_0$  подается с выхода передатчика через коаксиальный кабель связи на разъем 2 модуля 1 ВМП. Далее часть энергии высокочастотных колебаний передатчика, ранее рассеиваемой в тепловую форму на согласующем сопротивлении 3, подается на вход источника питания 7. Другая часть энергии ВЧ-колебаний поступает через импеданс связи 4 на блок моста 5. Величина магнитной индукции  $V_0$ , при которой возникает сигнал ядерного (или электронного) магнитного резонанса, связана с рабочей частотой прибора  $f_0$  соотношением

$$V_0 = (2 \pi f_0) / \gamma , \quad (1)$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение ядер (электронов) рабочего вещества [1]. При выполнении условия (1) происходит поглощение энергии ВЧ-колебаний ансамблем ядерных (электронных) спинов рабочего вещества. Поглощение энергии эквивалентно уменьшению добротности катушки индуктивности (датчика) с образцом спинов и, следовательно, добротности колебательного контура. В результате происходит расстройка радиочастотного моста 5 (простейшим радиочастотным мостом является параллельный или последовательный резонансный контур) и изменяется его выходное напряжение.

Известно [2], что изменение проводимости вызывает максимальное изменение напряжение на колебательном контуре в том случае, если полный ток контура не меняется по величине. Это условие выполняется, если связь контура с передатчиком осуществляется импеданс 4, значение которого намного больше величины импеданса колебательного контура (контуров) моста 5 (например, через резистор с большим активным сопротивлением или малую емкость).

В блок предусилителя 6 из блока питания 7, состоящего из пассивных элементов, одновременно с постоянным напряжением поступают шумы передатчика, а также внешние помехи в полосе частот, определяемой частотой среза  $f_c$  фильтра в блоке питания 7. Полезный сигнал магнитного резонанса совместно с шумами и помехами поступает с выхода моста 5 на вход блока предусилителя 6, где преобразуется амплитудным детектором и подается на вход собственно предусилителя, имеющего структуру, способную компенсировать когерентные шумы передатчика. Возможность компенсации обусловлена также тем, что в блок предусилителя 6 одновременно с постоянным напряжением питания поступают шумы передатчика в полосе частот, определяемой частотой среза  $f_c$  фильтра в блоке питания 7. С целью наиболее полной компенсации шумов полоса среза НЧ-фильтра блока питания устанавливается равной полосе пропускания детектором сигнала магнитного резонанса блока 6, при этом номинал резистора нагрузки 3 выбирается из условия равенства сопротивления нагрузки волновому сопротивлению кабеля связи с приемо-передатчиком.

Предлагаемый ВМП имеет ряд преимуществ перед устройствами с компенсацией шумов на ВЧ. Во-первых, в данном модуле возможна полная компенсация шумов при значительно простой схеме, поскольку компенсация происходит после прохождения напряжения высокочастотных колебаний радиочастотного моста, на выходе которого присутствует детерминированный сигнал магнитного резонанса (сигнал поглощения или дисперсии). Во-вторых, используется простейшая мостовая схема – одиночный колебательный контур, менее чувствительный к внешним воздействиям по сравнению с более сложными мостовыми схемами. Дополнительное преимущество обусловлено также тем, что в НЧ-тракте отсутствуют резонансные контуры, поэтому предусилитель имеет низкую чувствительность к действию внешних факторов (вибрациям, колебаниям температуры и т.д.). ВМП характеризуется также низким уровнем собственного шума: источник питания выполнен на пассивных элементах, и применены ВЧ-конденсаторы, имеющие малый уровень токов утечки [7,8].

Предлагаемое устройство обладает повышенной защищенностью к действию внешних помех вследствие того, что на его входе отсекаются все частоты вплоть до рабочей частоты  $f_0$ , и ВЧ-конденсаторы модуля имеют небольшие собственные значения индуктивности. Еще раз подчеркнем, что в разработанном модуле не применяются как активные элементы в источнике питания, так и фильтрующие конденсаторы большой емкости (ниобиевые, танталовые и т.д.), имеющие высокий уровень токов утечки и, следовательно, и шумов. Поэтому источник питания обладает минимальным собственным шумом. Кроме того, разделительные и фильтрующие конденсаторы в других блоках и цепях этого модуля также не содержат конденсаторов большой емкости, обладающих, кроме значительных токов утечки, большими собственными значениями индуктивности, которые могут создавать паразитные приемные контуры, а значит, повышенную чувствительность к внешним помехам [7, 8].

На рис. 2 представлена принципиальная электрическая схема модуля. Здесь С2 – конденсатор связи, L1, C3 – элементы колебательного контура, в катушке индуктивности которого находится рабочее вещество, содержащее ядерные (электронные) спины. На элементах VD1, VD2, R2, C5 выполнен амплитудный детектор с удвоением и НЧ-фильтр. Предусилитель собран на транзисторах VT1, VT2, усиление полезного сигнала и

компенсация когерентных шумов и помех происходит в каскаде, собранном на двойном транзисторе VT1. Пассивный источник питания выполнен на диодах VD3, VD4 и конденсаторе C9.

Исследование схемы на частоте  $f_0 \approx 4$  МГц показало, что применение разработанного модуля позволяет увеличить отношение сигнал/шум не менее чем на 10 - 15 дБ.

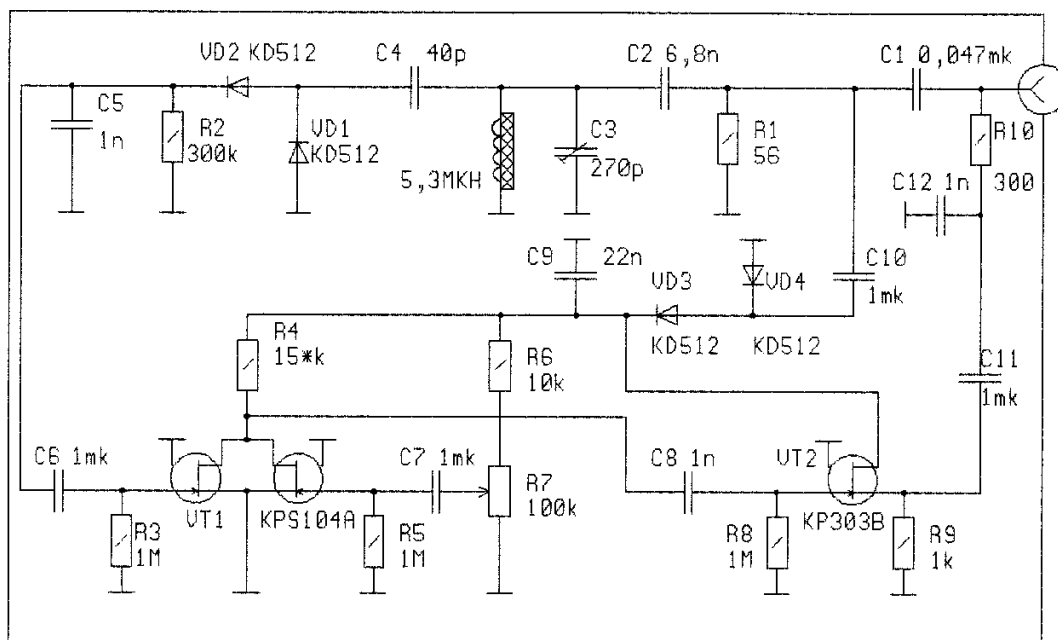


Рис.2. Принципиальная схема модуля.

## Литература

1. Леше А. Ядерная индукция – М.: ИЛ, 1963, 684 с.
2. Эндрю Э. Ядерный магнитный резонанс. – М.: ИЛ, 1957.
3. Лундин А.Г., Федин Э.И. ЯМР-спектроскопия. – М., «Наука», 1986, 224с.
4. Лаврентьев В.И., Рыжов В.Г., Поминов О.Н. А.С. № 1410651 – Оpubл. в БИ, 1990, № 34, с. 317.
4. Borer K. and Fremont G. The nuclear magnetic resonance magnetometer type 9298. – Pr. CERN 77-19, Geneva, 1977, 23 p.
5. Borer K. The nuclear magnetic resonance system for the CERN muon storage ring. Nuclear Instr. and Meth., 1977, № 2, p. 203 - 208.
7. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. – М., «Мир». 1986, т.1, 598 с.
8. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. – М., «Мир». 1979, 317 с.