

Министерство образования и науки Российской Федерации
КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
КАФЕДРА КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И РАДИОСПЕКТРОСКОПИИ

Направление: 010800.62 – Радиофизика

КУРСОВАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

**Спектрометр импульсного ЯМР: влияние
искусственной четвертьволновой линии на
интенсивность сигнала спинового эха.**

Работа завершена:

" ___ " _____ 2015 г. _____ (В.И.Катков)

Работа допущена к защите:

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент НИЛ МРС и КЭ

" ___ " _____ 2015 г. _____ (А.В.Дуглав)

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

" ___ " _____ 2015 г. _____ (М.С.Тагиров)

Казань – 2015

Содержание

1. Цель работы.
2. Явление ядерного спинового эха.
3. Типичная блок-схема импульсного спектрометра ЯМР.
4. Защита приемной аппаратуры от перегрузок во время действия импульса.
5. Конструкция искусственной четвертьволновой линии.
6. Вывод.
7. Литература.

1. Цель работы.

Целью работы было изготовление ряда искусственных четвертьволновых линий на разные перекрывающиеся диапазоны частот и измерение их влияния на амплитуду ВЧ-импульса и на амплитуду сигнала ЯМР.

2. Явление ядерного спинового эха.

В первом приближении ядро можно представить как электрически заряженный шар, вращающийся вокруг своей оси. Вращение заряда приводит к появлению магнитного момента ядра, который направлен вдоль оси вращения. Если этот магнитный момент поместить в постоянное внешнее поле, то вектор этого момента начинает прецессировать, т.е. вращаться вокруг направления внешнего поля (рис.1).

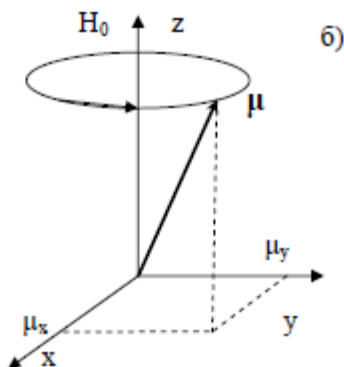


Рисунок 1. Прецессия магнитного момента в постоянном магнитном поле напряженностью H_0 .

Как известно, энергия взаимодействия магнитного момента ядра с внешним магнитным полем может принимать только несколько дискретных значений.

$$\Delta E = \gamma \hbar H_0 \quad (1)$$

Тогда условие (2) определяет частоту ЯМР.

$$\omega_0 = \gamma H_0 \quad (2)$$

Существуют два основных метода наблюдения ЯМР, непрерывный и импульсный.

Непрерывный метод наблюдения ЯМР – это когда частота или поле медленно проходит через частоту резонанса. При использовании стационарных методов изучения ЯМР на образец действует непрерывное или квазинепрерывное радиочастотное поле. Исследуемое вещество помещается в катушку колебательного контура, в котором возбуждаются радиочастотные колебания. Когда частота колебания генератора совпадает с резонансной частотой ЯМР, вещество поглощает энергию радиочастотного поля и вносит дополнительное

затухание в контур. Уменьшение амплитуды радиочастотных колебаний затем детектируется, усиливается и подается на вход регистрирующего устройства.

Импульсный метод заключается в воздействии на ядра, содержащиеся в образце, радиочастотными импульсами: 90-градусным и 180-градусным с последующей регистрацией либо сигнала спада свободной индукции, либо сигнала “спинового эха”. В момент резонанса магнитный момент ядра вращается вокруг оси x' во вращающейся системе координат с угловой частотой ω_0 (рис.2).

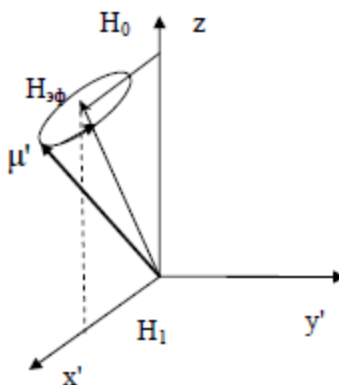


Рисунок 2. Движение магнитного момента во вращающейся системе координат.

Если на магнитный момент подействовать радиочастотным импульсом с амплитудой H_1 и длительностью t , такими, что $\gamma H_1 t = \pi/2$, то магнитный момент будет ориентирован вдоль y . Такой импульс называют 90- градусным. После выключения импульса магнитный момент покоится во ВСК, а в лабораторной – прецессирует с частотой $\omega_0 = \gamma H_0$, при этом сохраняя ориентацию, перпендикулярную H_0 . В результате прецессии в катушке наводится ЭДС, которая наблюдается в виде спада свободной индукции. Спустя некоторое время t после 90-градусного импульса подадим на систему спинов импульс длительностью t_1 - такой, что выполняется условие: $\gamma H_1 t_1 = \pi$. Такой импульс называют 180-градусным импульсом.

После воздействия 180-градусного импульса фазы движения ядерных спинов изменятся на противоположные, и они начнут сбегаться. В результате через время $2t$ от начала опыта возникает сигнал «эхо» (рис.3).

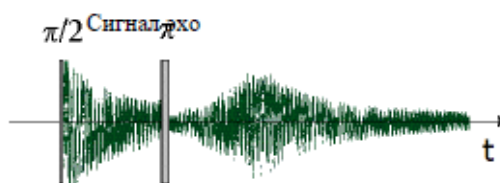


Рисунок 3. Форма сигнала спинового эха.

3. Типичная блок-схема импульсного спектрометра ЯМР.

Типичный импульсный ЯМР спектрометр работает следующим образом (рис.4).

Генератор импульсных последовательностей вырабатывает необходимую последовательность видеоимпульсов требуемой длительности и управляет работой формирователя радиоимпульсов. Формирователь радиоимпульсов (РЧ генератор) выполняет роль «ключа»: при прохождении переднего фронта импульса с генератора импульсных последовательностей открывается, пропуская сигнал с ВЧ генератора, и закрывается после прохождения заднего фронта, тем самым формируя последовательность радиоимпульсов. Получается, что радиоимпульсы формируются из того же сигнала, что и опорный сигнал, идущий на синхронный детектор, что дает когерентность фаз. Сформированный РЧ импульс попадает на усилитель мощности, в котором усиливается до выходной мощности $\sim 0,4-1$ КВт (амплитудой ~ 100 В на нагрузке 50 Ом). Поскольку катушка датчика используется для возбуждения спиновой системы и одновременно для приема сигнала спинового эха, то необходимо, чтобы мощность РИ, подаваемая на систему, полностью уходила туда, не просачиваясь в приемную аппаратуру (приемная аппаратура рассчитана на сигнал амплитудой порядка \sim мкВ). С этой целью между передатчиком и датчиком ЯМР устанавливается пара встречно параллельных диодов, а между датчиком ЯМР и приемником – четвертьволновая линия, с еще одной парой встречно-параллельных диодов на конце. Широкополосный предусилитель (малозумящий усилитель) усиливает и преобразует сигнал эха с датчика без заметного ухудшения отношения сигнал/шум. Усиление происходит с мкВ до величины $\sim 30-100$ мВ. Предусилитель располагается как можно ближе к датчику, чтобы свести к минимуму паразитные емкости и наводки на входные цепи. Широкополосный усилитель линейно увеличивает амплитуду выходного сигнала предусилителя до 0,1-1 В. С широкополосного усилителя сигнал поступает на два синхронных детектора. В данной схеме имеется два синхронных детектора для использования метода квадратурного детектирования. На обоих детекторах в качестве опорного сигнала используется сигнал с ВЧ генератора. На один из детекторов сигнал подается через 90-градусную фазосдвигающую цепочку, на другой – без изменения фазы. Сигналы с обоих детекторов поступают на усилители низких частот, где усиливаются до мощности, необходимой для активации АЦП. После АЦП сигналы обрабатываются компьютером.

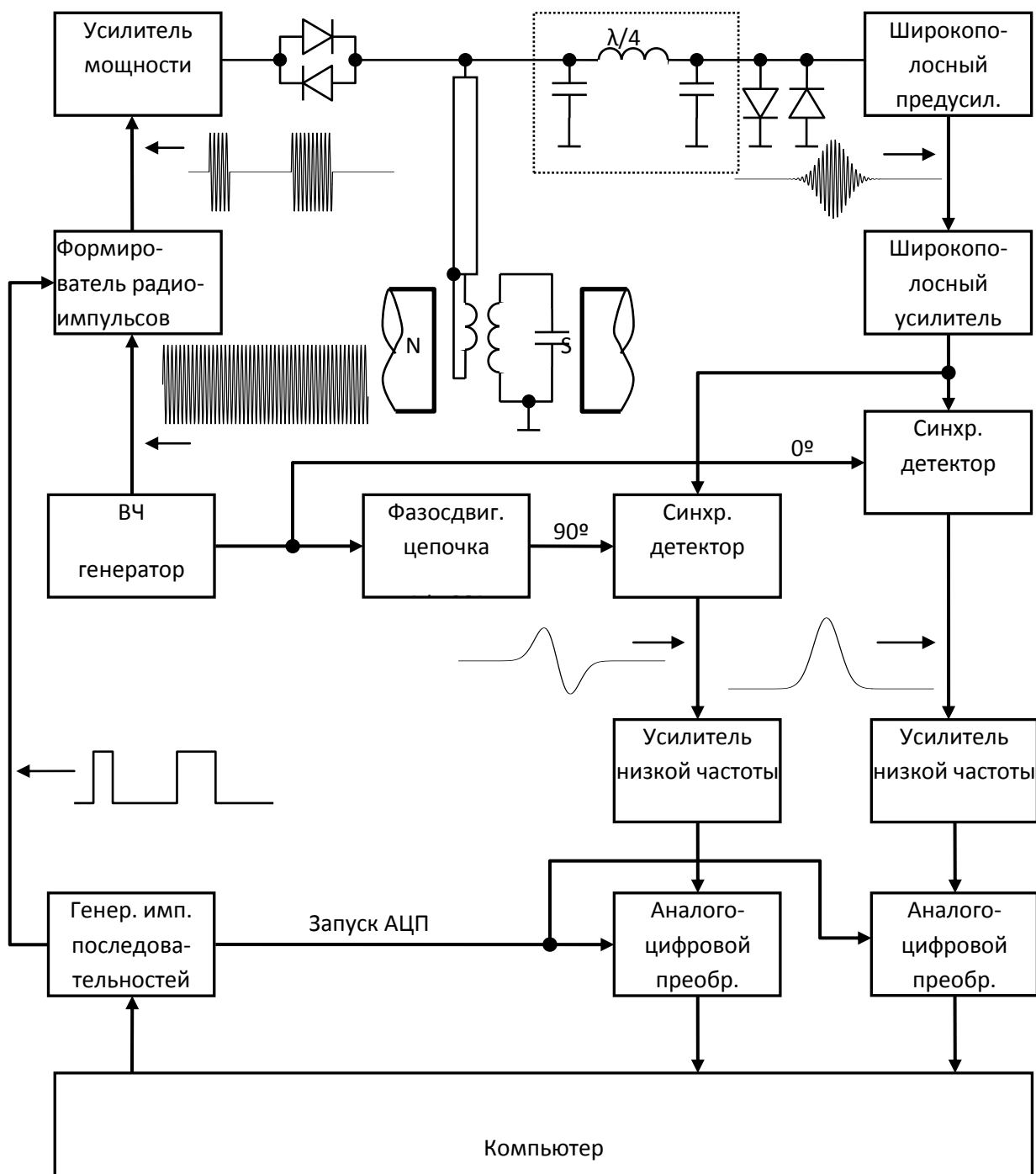


Рисунок 4. Блок-схема когерентного импульсного спектрометра ЯМР.

4. Защита приемной аппаратуры от перегрузок во время действия импульса.

Как было сказано выше, приемная аппаратура импульсного ЯМР спектрометра рассчитана на сигнал амплитудой порядка мкВ, спиновая система возбуждается импульсами амплитудой 100 В. Подаваемый и принимаемый сигналы снимаются с одной и той же катушки датчика.

Это означает, что между передатчиком, датчиком ЯМР и приемником должно иметься устройство, которое бы в момент подачи импульсов с генератора пропускало сигнал на колебательный контур, при этом не пропуская сигнал в приемную аппаратуру, а в следующий момент времени принимала маломощный сигнал с датчика ЯМР, не пропуская сигнал куда-либо, кроме приемной аппаратуры (рис.5).

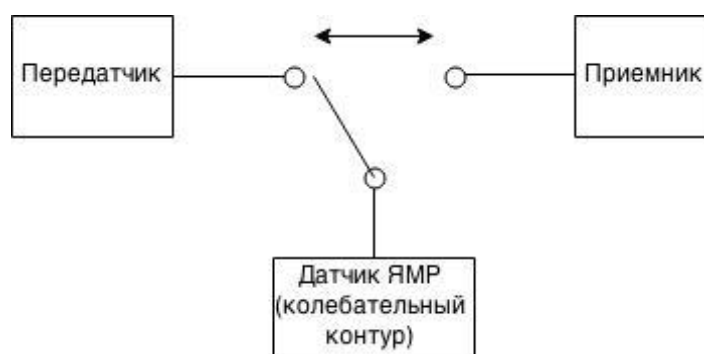


Рисунок 5. Принципиальная блок-схема переключения датчика ЯМР.

Подобным устройством может быть механический переключатель, поочередно подключающий датчик ЯМР к приемнику или передатчику. Подобное устройство нужно согласовывать с промежутком времени после окончания действия импульса и появлением отклика системы (0,5-500 мкс). Использование механических устройств не распространено из-за их очень медленного переключения.

Обычно используется следующее решение: между передатчиком и датчиком ЯМР устанавливается последовательно пара встречно-параллельных диодов, между датчиком ЯМР и приемником устанавливается последовательно четвертьволновая линия, после которой параллельно устанавливается еще одна пара встречно-параллельных диодов (рис.6).

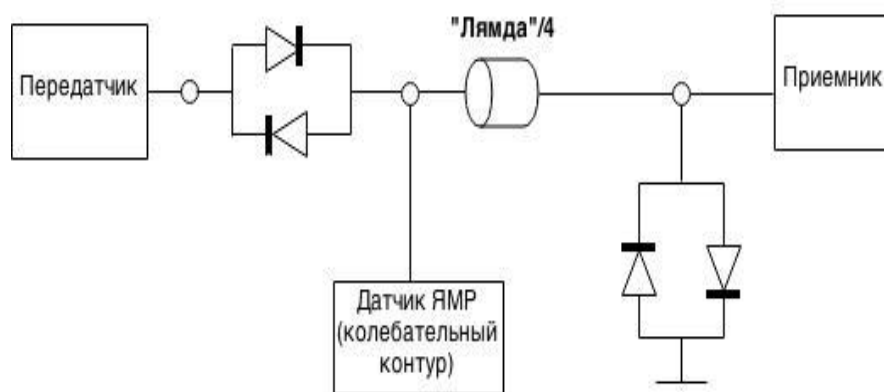


Рисунок 6. Принцип включения встречно-параллельных диодов и отрезка и отрезка 50-омной линии передачи длиной $\lambda/4$.

Диоды имеют свойство «хорошо» пропускать ток при прямом включении, и плохо при обратном. Характерные ВАХ кремниевого (Si) и германиевого (Ge) диодов приведены на рисунке 7.

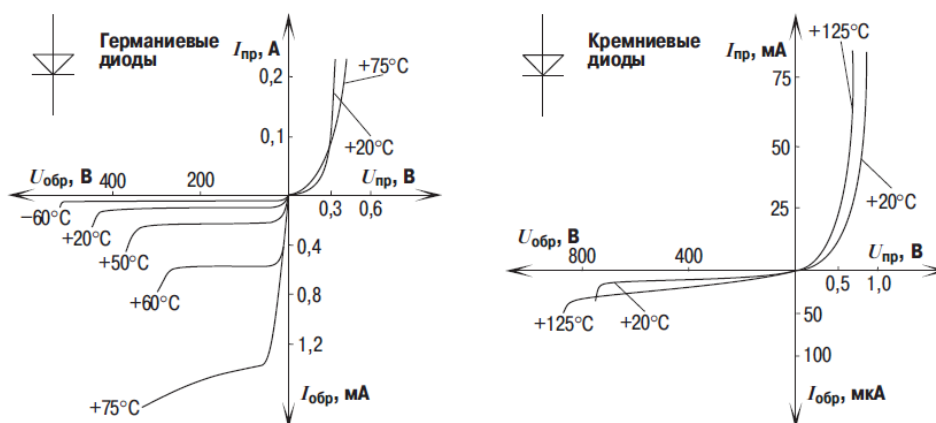


Рисунок 7. ВАХ германиевых и кремниевых диодов.

Как видно из рисунка 7, при прямом включении существенный ток (мА) протекает при напряжениях от 0,1-0,2 В для германиевых, и от 0,4-0,5 В для кремниевых диодов.

При обратном включении так называемый «тепловой ток» в идеализированном диоде не зависит от приложенного напряжения вплоть до напряжения «пробоя». Величина «теплого тока» составляет мкА. Таким образом, соединив два диода встречно-параллельно, получится «ключ», хорошо пропускающий переменный ток с амплитудой напряжения $|U| > 0,5$ В, и не пропускающий сигнал амплитудой $|U| < 0,5$ В. (рис.8)

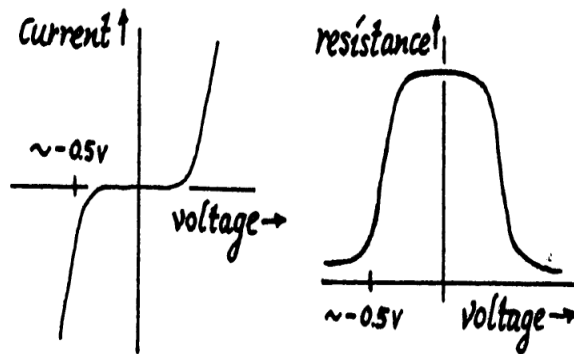


Рисунок 8. ВАХ и зависимость сопротивления от приложенного напряжения для пары диодов, соединенных встречно-параллельно.

Рассмотрим свойства четвертьволновой линии.

Как известно, входное сопротивление линии зависит от того, на какое сопротивление данная линия нагружена.

$$Z_{вх} = Z_0 \frac{Z_H + jZ_0 \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi L}{\lambda}\right)}{Z_0 + jZ_H \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi L}{\lambda}\right)} \quad (3)$$

Также важным параметром является коэффициент отражения.

$$\Gamma = \frac{Z_H - Z_0}{Z_H + Z_0} \quad (4)$$

Так, при бесконечно большом Z_H , в пределе при разрыве цепи, $\Gamma=1$, происходит полное отражение сигнала, без изменения фазы. При $Z_H = 0$, $\Gamma=-1$, сигнал отразится, с изменением фазы на 180° . В случае если не происходит полного отражения, то возможно частичное отражение, которые отрицательно влияет на принимаемый сигнал. Чтобы избежать нежелательных отражений, волновое сопротивление линии и сопротивление нагрузки согласовывают, т.е. выполняют условие $Z_H = Z_0$. В технике ЯМР стандартным является согласование на 50 Ом.

Рассмотрим принцип совместной работы четвертьволновой линии и встречно-параллельных диодов.

При прохождении мощного сигнала с передатчика (сотни вольт) пара встречно-параллельных диодов представляет собой короткое замыкание, следовательно, конец четвертьволновой линии оказывается также замкнут накоротко, это приводит к тому, что входное сопротивление линии становится бесконечно большим, на практике $Z_{вх}$ достигает значений порядка $\sim 10-50$ Ком. За счет этого большая часть мощности передатчика (в идеальном случае вся) идет в ЯМР датчик (рис.9).



Рисунок 9. Момент действия импульса. Рисунок 10. Момент отклика системы.

Маломощный сигнал амплитудой $\mu\text{кВ}$ не способен «открыть» диоды, поэтому в участке цепи между передатчиком и датчиком ЯМР будет разрыв (рис.10), четвертьволновая линия при этом будет нагружена на входное сопротивление приемника ($50\ \text{Ом}$). Учитывая, что сопротивление четвертьволновой линии, нагруженной на активное сопротивление, также активное, а отражения в линии отсутствуют в силу согласования нагрузок, сигнал с датчика без искажений регистрируется приемной аппаратурой.

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z_0^2}{Z_{\text{н}}}, \text{ где } Z_0 = Z_{\text{н}}, \text{ тогда } Z_{\text{вх}} = Z_0 \quad (5)$$

5. Конструкция искусственной четвертьволновой линии.

На частотах порядка $10\ \text{МГц}$ длина линии $\lambda/4$ оказывается слишком большой, и вместо нее используют искусственную линию $\lambda/4$ с сосредоточенными параметрами (рис.11).



Рисунок 11. Эквивалент длинной линии - цепь с сосредоточенными параметрами, LC-контур.

Величину L и C выбирают из двух условий: волновое сопротивление искусственной линии $Z_0 = \sqrt{L/C} = 50\ \text{Ом}$, резонансная частота параллельного колебательного LC-контура, образующегося при коротком замыкании на выходе, $1/\sqrt{LC} = \omega_0$. Несмотря на то, что оба эти условия можно выполнить, строго говоря, только лишь на одной частоте, искусственная линия $\lambda/4$ удовлетворительно работает в некотором диапазоне частот вблизи резонансной.

Далее приведены схемы измерения влияния $\lambda/4$ на амплитуду ВЧ импульсов (рис.12) и на амплитуду сигнала (рис.13.).

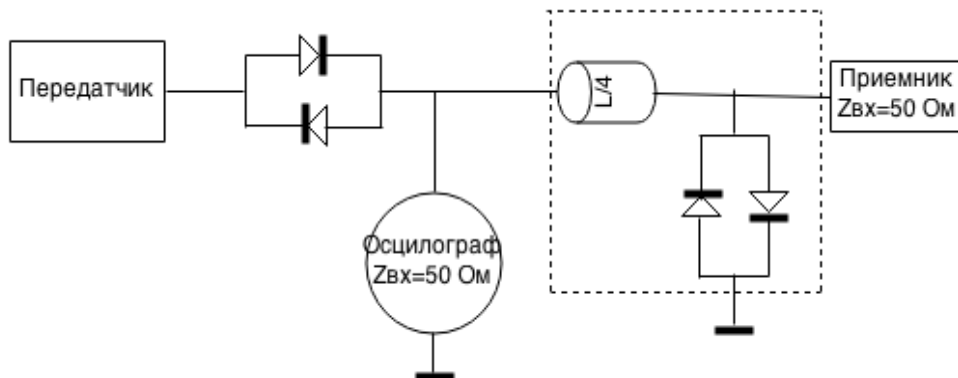


Рисунок 12. Схема измерения влияния четвертьволновой линии на амплитуду ВЧ импульсов.

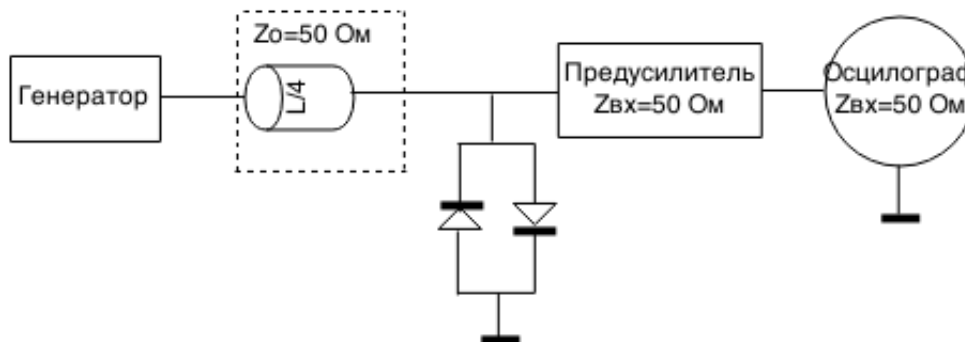


Рисунок 13. Схема измерения влияния четвертьволновой линии на амплитуду сигнала ЯМР, имитируемого маломощным генератором.

Амплитудно-частотная характеристика влияния $\lambda/4$ на амплитуду ВЧ импульсов и на амплитуду сигнала приведена для искусственной $\lambda/4$ ($L=0,55$ мкГн, $C=220$ пФ), рассчитанной для частоты 17 МГц (рис 14).

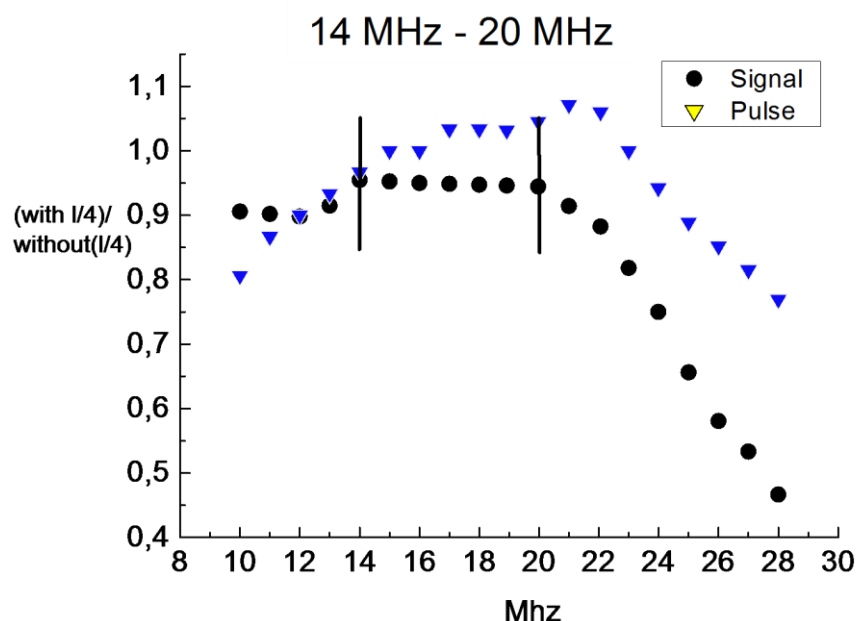


Рисунок 14. Отношение АЧХ с четвертьволновой линии к АЧХ без четвертьволновой линии для сигнала и импульсов.

6. Вывод.

Из рисунка 14 видно, что ослабление амплитуды радиочастотного импульса на контуре, возбуждающего спиновую систему, и амплитуды сигнала спинового эха составляет приблизительно 5%. Таким образом, диапазон 24 – 80 МГц можно перекрыть с помощью четырех искусственных четвертьволновых линий.

Результаты исследования важны для правильной оценки относительной интенсивности отдельных линий спектров ЯКР, измерение которых проводится обычно при протяжке частоты в широком диапазоне.

7. Литература:

1. А.К.Москалев. Курс лекций по ЯМР. Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет».
2. Eiichi Fukushima, Stephen B.w. Roeder Experimental Pulse NMR: A Nuts and Bolts Approach.
3. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. Изд. 4-е-М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013.- 512 с.