

лять эффективные теплопроводности нагретых зон радиоэлектронных аппаратов до  $\lambda < 20$  Вт/м · град.

При значениях  $\lambda$  значительно превышающие указанные значения нестационарный процесс будет настолько скоротечным (например, при  $\lambda = 60$  Вт/м · град. из (13) имеем  $1/m_{\infty} = 20$  сек., т.е. весь нестационарный процесс закончится за  $2(1/m_{\infty}) = 40$  сек., что практически, фиксировать изменение температуры во времени обычными средствами окажется невозможными в силу их инерционности. Для чего потребуются специальная аппаратура, что существенно усложняет и удорожает эксперимент и сделает его экономически нецелесообразным.

## Выводы

1. При проведении эксперимента при  $Bi = \infty$ , мы сможем определять эффективную  $1 < \lambda < 20$  Вт/м · град. анизотропного тела в двух направлениях, а для определения в третьем направлении, при условии, что  $\lambda_z < 1$ , можно применять метод многих точек в условиях естественной конвекции и  $Bi = 3$ , т.е. мы приходим к единому методу.

Таким образом, полученный метод может быть использован, как самостоятельный или как поверочный.

2. Метод может быть использован как самостоятельный или как поверочный при  $\lambda_x \approx \lambda_y \approx \lambda_z$ .

## Литература

1. Майко И.М., Синотин А.М. Экспериментальное определение эффективной теплопроводности нагретых зон радиоэлектронных аппаратов. – Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, 1972, № 2, С. 13 – 17.
2. Майко И.М., Детинов Ю.М., Синотин А.М. О теплофизическом конструировании одноблочных радиоэлектронных аппаратов с заданным тепловым режимом. – Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, 1974. № 1 С. 80 – 87.

УДК 539.184.28:621.375.4

# ЗЕЕМАН - МОДУЛЯТОР С ПРЕЦИЗИОННОЙ ФОРМОЙ ВЫХОДНОГО ТОКА

*Розглянуто підсилювач потужності, в якому для корекції форми струму навантаження застосована схема джерела струму, керованого напругою. Дослідження, проведені з допомогою запропонованої схеми, показали усунення синхронної завади при реєстрації спектру ЯКР*

*Ключові слова: ЯКР, ДСКН, індуктивне навантаження, котушки Гельмгольца*

*Рассмотрен усилитель мощности, в котором для коррекции формы тока нагрузки применена схема источника тока, управляемого напряжением. Исследования, проведенные с помощью предложенной схемы, показали устранение синхронной помехи при регистрации спектра ЯКР*

*Ключевые слова: ЯКР, ИТУН, индуктивная нагрузка, катушки Гельмгольца*

*The power amplifier in which to correct the shape of the load current applied current controlled voltage source is considered. Studies using proposed scheme, the destruction of synchronous interference during registration NQR spectrum shown*

*Key words: NQR, CCVS, inductive load, Helmholtz coil*

**А. П. Самила**  
Аспирант\*

E-mail: asound@ukr.net

**А. Г. Хандожко**

Доктор физико-математических наук, профессор\*

E-mail: khand@chv.ukrpack.net

\*Кафедра радиотехники и информационной безопасности

Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

ул. Коцюбинского, 2, г. Черновцы, Украина, 58000

Контактный тел.: (03722) 4-24-36

**В. А. Хандожко**

Заместитель технического директора

Телерадиокомпания «НБМ»

ул. Электриков, 26, г. Киев, Украина, 04176

Контактный тел.: (044) 351-77-20

E-mail: khand@chv.ukrpack.net

## 1. Введение

Несмотря на интенсивное развитие импульсных методов в резонансной радиоспектроскопии, стационарные методы не потеряли актуальность и до сих пор широко используются в лабораторной практике. Особенно это касается спектроскопии ядерного квадрупольного резонанса, где отсутствие сильного

онарные методы не потеряли актуальность и до сих пор широко используются в лабораторной практике. Особенно это касается спектроскопии ядерного квадрупольного резонанса, где отсутствие сильного

внешнего магнитного поля, делает их более привлекательными и доступными для исследователей. При непрерывном прохождении через условия резонанса распространена техника модуляционной спектроскопии с последующим синхронным детектированием на выбранной гармонике частоты модуляции. В этом случае преимуществен метод зееман-модуляции (ЗМ) условий резонанса вследствие его стабильности и нечувствительности к радиочастотным помехам [1,2]. Важной особенностью ЗМ по сравнению с частотной модуляцией, которая также используется в технике ЯКР, является нечувствительность спектрометра к пьезоэлектрическим резонансам и отсутствие синхронной помехи. Последнее осуществляется помещением исследуемого образца в модулирующее магнитное поле биполярной формы [2]. При этом устраняется прямая наводка в катушку приемного контура датчика [3] на второй гармонике частоты модуляции.

Максимальная амплитуда импульсов магнитного поля может достигать 100 Гс, что зависит от значения параметра асимметрии градиента электрического поля в месте расположения резонирующего ядра. При подключении индуктивной нагрузки к выходу усилителя мощности, модулирующего магнитное поле, из-за переходных процессов наблюдается размывание фронтов прямоугольной формы импульсов тока в катушке и, соответственно, магнитного поля на образце. Это особенно ощутимо при значительных объемах образца и больших размерах модулирующих катушек, которые, как правило, выполняются в виде катушек Гельмгольца. Нечеткое подавление сигнала ЯКР приводит к уширению резонансной линии и, фактически, к снижению чувствительности спектрометра. Для ослабления переходных процессов и поддержания формы тока в катушках, соответствующей форме входного напряжения предлагается построение модулирующего усилителя на основе схемы источника тока, управляемого напряжением (ИТУН) [4].

## 2. Схемотехническая реализация

Источники тока, управляемые напряжением, предназначены для питания нагрузки током, сила которого не зависит от выходного и регулируется только входным напряжением схемы. Упрощенная функциональная схема ИТУН показана на рис. 1. Управляющее напряжение  $U_{вх}$  подается на неинвертирующий вход операционного усилителя ОУ “раскачивающего” усилитель мощности УМ. Последний нагружен последовательно соединенными катушкой индуктивности  $L_M$  и токоизмерительным сопротивлением  $R_0$ . Обратная связь по току образуется за счет подачи на инвертирующий вход ОУ напряжения, снимаемого с  $R_0$ , номиналом которого определяется крутизна преобразования “напряжение-ток” и, фактически, степень компенсации искажений формы тока в  $L_M$ . Особенностью ИТУН является его высокое выходное сопротивление.

Принципиальная схема усилителя мощности приведена на рис. 2. Его основой является операционный усилитель DA1 с подключенными мощными полевыми транзисторами VT1-VT8. Применение полевых транзисторов в схеме обусловлено низким сопротивлением канала в отличие от биполярных и соответственно, меньшим тепловыделением.

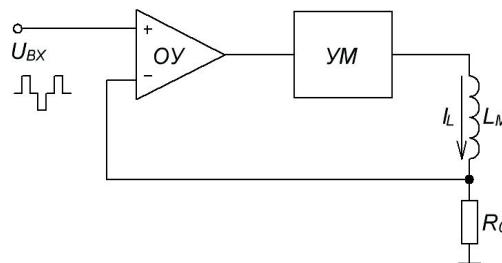


Рис. 1. Функциональная схема источника тока, управляемого напряжением

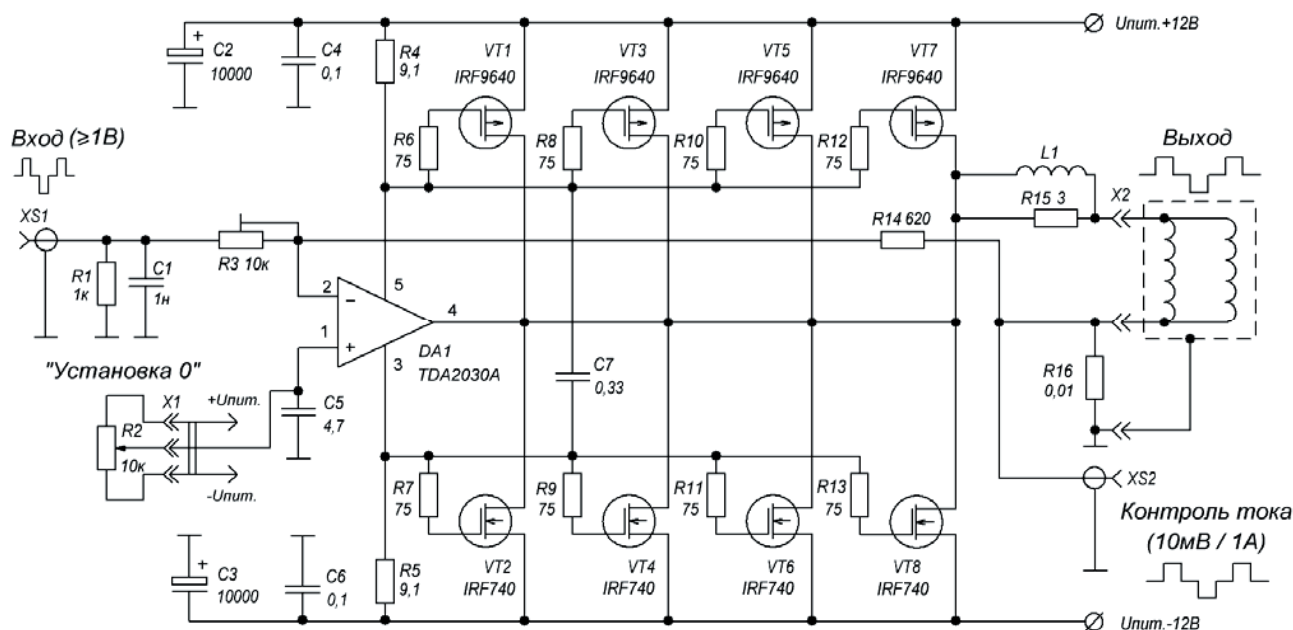


Рис. 2. Усилитель мощности управляющего напряжения на ИТУН

Глубина обратной связи по току регулируется подбором  $R$  и  $R_2$ . При этом, на инвертирующий вход DA1 подаются как сигнал управления (напряжение биполярной формы), так и сигнал ОС, снимаемый с  $R_0$ . К неинвертирующему входу DA1 подключена цепь смещения нулевого уровня тока и, соответственно, напряженности магнитного поля в модулирующих катушках. Для предотвращения высокочастотного возбуждения последовательно с нагрузкой включена цепь L1 и R15.

Особенностью управления полевыми транзисторами VT1 – VT8 является их включение с DA1 по схеме “с разгрузкой по току” [5]. Такое включение транзисторов позволяет разгрузить выход операционного усилителя и использовать транзисторы в щадящем режиме.

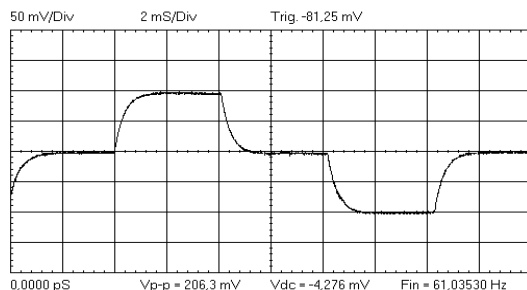
Для питания усилителя используется двухполярный источник питания напряжением  $\pm 12\text{В}$ . В качестве нагрузки  $L_M$  использованы катушки Гельмгольца со следующими параметрами: диаметр катушки – 10.5 см; активное сопротивление каждой катушки – 0.1 Ом; индуктивность – 110  $\mu\text{H}$ . Катушки могут быть включены как последовательно, так и параллельно. При последовательном включении максимум магнитного поля достигает  $\pm 15\text{ Гс}$  при токе в нагрузке 10 А. Для визуализации формы тока в нагрузке и контроля его уровня сопротивление  $R_0$  откалибровано и составляет величину  $0.01 \pm 5\%$  Ом.

Для формирования управляющего напряжения биполярной формы используется схема, построенная на логических элементах DD1-DD3 со вспомогательными компонентами DA1, DA2 и VT1.1-VT1.2 (рис. 3).

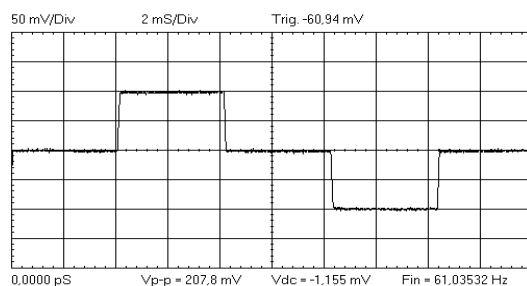
Схема работает следующим образом. На вход усилителя-ограничителя DA1 с внешнего генератора низких частот подается напряжение синусоидальной формы частотой  $2F_M = 90\text{--}600\text{ Гц}$  и амплитудой  $20 \div 700\text{ мВ}$ . Дальнейшее формирование фронтов импульсного сигнала осуществляется триггерами DD1.1-DD1.2. Элемент DD1.3 служит для формирования сигнала с полярностью противоположной сигналу на выходе DD1.2.

С помощью DD2.1 – DD2.2 и элементов DD3.1 – DD3.3 формируются импульсы с периодом  $1/F_M$ , которые складываются на сопротивлении  $R$  (симметрия) и образуют сигнал биполярной формы. Общий размах напряжения биполярного сигнала устанавливается резистором  $R$  (размах). Выходной сигнал с уровнем 0-7 В снимается с повторителя напряжения на операционном усилителе DA2. Для питания схемы формирователя использован двухполярный источник питания, напряжением  $\pm 12\text{ В}$ . На рис. 4 приведены осциллограммы тока в катушках Гельмгольца при отключенной и включенной ОС.

ливається резистором  $R$  (размах). Выходной сигнал с уровнем 0-7 В снимается с повторителя напряжения на операционном усилителе DA2. Для питания схемы формирователя использован двухполярный источник питания, напряжением  $\pm 12\text{ В}$ . На рис. 4 приведены осциллограммы тока в катушках Гельмгольца при отключенной и включенной ОС.



а)



б)

Рис. 4. Влияние ОС на форму тока в индуктивной нагрузке: а – связь по току отсутствует; б – при включенной ОС (режим ИТУН)

### 3. Эксперимент

Разработанной модулятор использовался в составе установки стационарного радиоспектрометра ЯКР при исследовании слоистых полупроводниковых кристаллов InSe. Данные кристаллы находят широкое применение при разработке оптоэлектронных

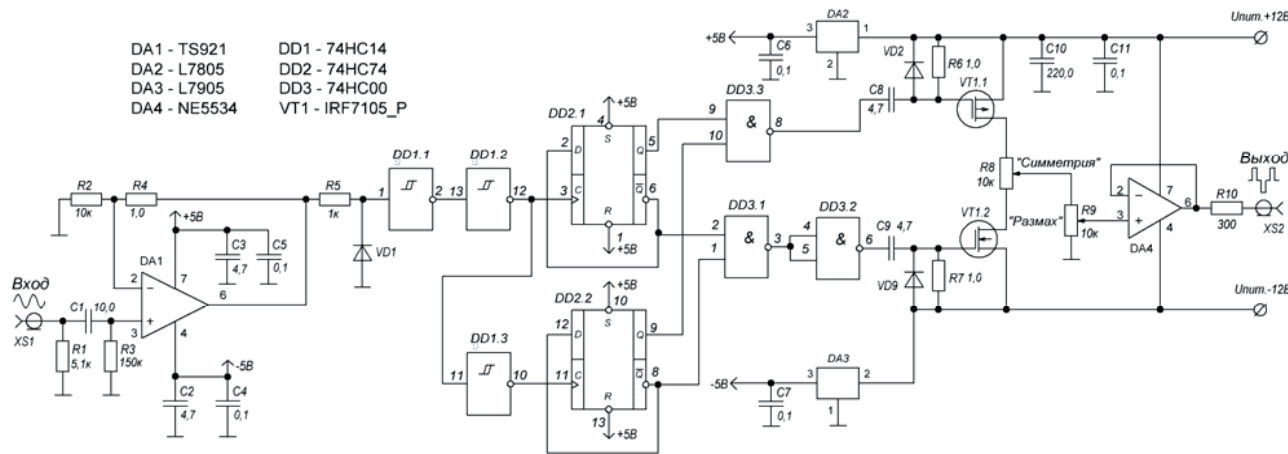


Рис. 3. Формирователь биполярных импульсов

приборов, в частности, для изготовления гетерофотодиодов видимого диапазона. Наличие множества политипных модификаций в кристаллической структуре упомянутого материала приводит к образованию в объеме кристалла своеобразного молекулярного каркаса, который обнаруживается по спектрам ЯКР. Степень упорядочения спектра, его разрешение дают возможность определить совершенство кристалла в процессе технологической термообработки. На рис. 5 приведен спектр ЯКР  $^{115}\text{In}$  в кристаллическом образце InSe объемом  $\approx 1 \text{ см}^3$ . Спектр записан для квадрупольного перехода  $^{115}\text{In} \ 3/2 \leftrightarrow 5/2$  в частотном диапазоне 20 МГц. Для детектирования резонанса использован автодинный датчик [3] с применением магнитной биполярной модуляции. Амплитуда им-

пульсов магнитного поля в катушках Гельмгольца составляла 5 Гс, а частота повторения импульсов ( $F_M$ ) равна 73 Гц. Период прохождения спектра составил 20 минут. Для детектирования сигнала применялась техника синхронного детектирования на 2-й гармонике частоты модуляции.

Как видно из рис. 5, использование модуляции частоты напряжением биполярной формы обеспечило устранение дрейфа базовой линии при регистрации сложного мультиплетного спектра. При этом поддержание формы тока в катушках с помощью построенного модулирующего усилителя на основе схемы источника тока, управляемого напряжением обеспечило более тонкую регистрацию резонансных линий без существенного их уширения.

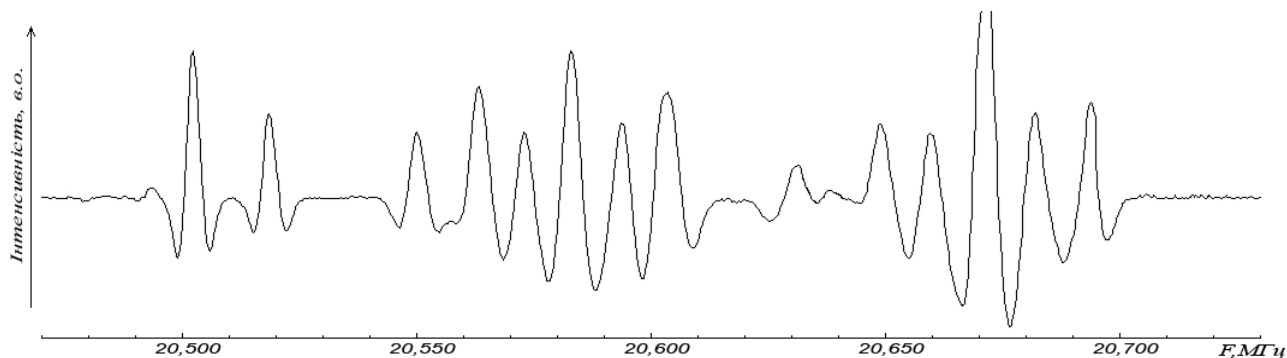


Рис. 5. Пример записи спектра ЯКР  $^{115}\text{In}$  в слоистом полупроводниковом кристалле InSe

#### Литература

1. Robinson F.N.H. A bi-symmetric Zeeman modulator for nuclear quadrupole resonance // J. Phys. E: Sci. Instrum, 1980.-V.13.-P. 961-963.
2. Mao D, Petersen G.L., Bray P.J. A bi-symmetric square wave Zeeman modulator for nuclear quadrupole resonance // Solid State Nucl. Magn. Reson, 1992.-V.1. Issue 4.-P. 227-230.
3. Браиловский В.В., Самила А.П., Хандожко А.Г. Датчик сигналов ядерного квадрупольного резонанса // ПТЭ, 2010.-№2.-С.177.
4. Agapito J.A. et al. Instrumentation amplifiers and voltage controlled current sources for LHC cryogenic instrumentation // Proceedings of the Sixth Workshop on Electronics for LHC Experiments LEB 2000. Cracow, Poland. 11 - 15 Sep. 2000.
5. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике. Пер. с нем. М.: Мир, 1991.-С. 446.