

Л. Л. ДЕКАБРУН, Ю. Н. КИЛЬЯНОВ, А. Р. МКРТЧЯН

АВТОДИННЫЕ ДАТЧИКИ СИГНАЛОВ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Автодинные датчики при малых величинах напряжения на колебательном контуре работают неустойчиво. Поскольку такой режим необходим при исследованиях методом ЯМР твердых тел, где автодинные датчики имеют ряд преимуществ перед другими видами датчиков, амплитуда генерируемого напряжения должна быть стабилизирована. В статье дается анализ стабилизирующего действия активной отрицательной обратной связи, а также переходных процессов в автодинном датчике со стабилизацией амплитуды, на основании чего уточняются детали схемы датчика. Рассмотрен вопрос о чувствительности автодинных датчиков, в которых теоретический анализ, вследствие нелинейности основной схемы, не может дать конкретных результатов. Наиболее прямым путем решения вопроса является эмпирический выбор схемы автодина и ее деталей, осуществляемый в сопоставимых условиях. Приводится полная принципиальная схема автодинного датчика, хорошо зарекомендовавшего себя при исследовании методом ЯМР кристаллов ряда природных соединений.

Ламповым генераторам высокочастотных колебаний присуща способность изменять амплитуду генерируемого напряжения при введении в магнитное поле катушки колебательного контура веществ, обладающих конечной электрической проводимостью. Эта способность давно используется в измерительной технике, где ламповые генераторы впервые были применены в качестве высокочувствительных датчиков перемещения [1].

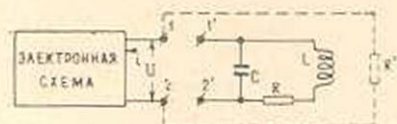
С помощью ламповых генераторов были предприняты первые попытки обнаружить сигналы ядерного магнитного резонанса (ЯМР) от веществ в их естественном состоянии [2]. Сразу же после фундаментальных открытий Ф. Блоха [3] и Перселла [4], положивших начало спектроскопии ядерного магнитного резонанса, ламповые генераторы стали интенсивно использоваться для получения сигналов ЯМР [5]. Датчики сигналов ЯМР, построенные на основе ламповых генераторов, получили название автодинных датчиков (иногда их называют регенеративными датчиками). Они применяются для решения многих задач ЯМР — спектроскопии.

В настоящее время известны десятки вариантов схем автодинных датчиков сигналов ЯМР. Помимо ламповых генераторов, широко применяемых в технике радиосвязи (схемы Гартлея, Колпитца, Хут-Кюна, Шембея-Доу, транзитронная и другие) для ЯМР — спектроскопии было разработано большое количество специальных схем, среди которых имеются достаточно сложные, например, двухтактная схема

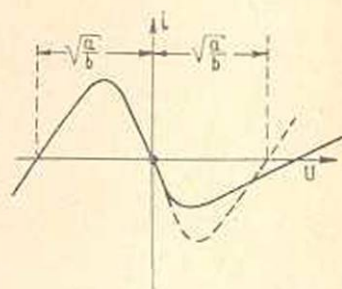
[6] или специальная схема, описанная в [7]. Разработка схем автодинных датчиков опирается на общую теорию ламповых генераторов с самовозбуждением [8]. „Механизм“ воздействия сигнала ЯМР или других факторов на режим автодинного датчика и амплитуду его напряжения хорошо изучен [9,10].

Для исследования методом ЯМР — спектроскопии кристаллов некоторых природных соединений [11] потребовалась разработка автодинного датчика существенно нового вида, позволяющего в очень широких пределах регулировать напряженность H_1 радиочастотного магнитного поля, зондирующего кристалл (или, что то же самое, регулировать напряжение на контуре автодина). Кроме того, при исследовании кристаллов необходима чувствительность датчика более высокая, чем у большинства опубликованных схем. Датчики такого вида, очевидно могут найти применение при решении ряда других задач ЯМР-спектроскопии.

Принципиальная схема автодинного датчика представлена на фиг. 1. Это резонансный контур $L; C; R$, в котором электронная схема поддерживает незатухающие колебания резонансной частоты. Исследуемый образец расположен в катушке контура. Электронная схема, компенсирующая потери в контуре, должна со стороны своих выходных



Фиг. 1. Принцип действия самовозбуждающихся ламповых генераторов.



Фиг. 2. Вольт-амперные характеристики отрицательных сопротивлений. (Сплошная линия — естественная характеристика, пунктирная линия — аппроксимированная характеристика).

клемм 1, 2 иметь падающую вольт-амперную характеристику, соответствующую отрицательному активному сопротивлению. Такие характеристики (они получаются за счет охвата положительной обратной связи активного четырехполюсника) сугубо нелинейны, общий вид их представлен на фиг. 2. Для упрощения анализа характеристика аппроксимируется [8] зависимостью вида:

$$I = -au + bu^3, \quad (1)$$

описывающей строго симметричную кривую (пунктир на фиг. 2).

Практика не подтверждает некоторые выводы, неизбежно вытекающие из такой аппроксимации. В частности, это относится к амплитуде синусоидального напряжения на контуре (отметим здесь, что на контуре высокой добротности практически может поддерживаться

только синусоидальное напряжение резонансной частоты, так как для напряжения другой частоты сопротивление контура ничтожно мало).

Определим величину напряжения, генерируемого схемой. Если на входных клеммах электронной схемы с вольт-амперной характеристикой вида (1) действует напряжение

$$u = U_m \sin \omega t, \quad (2)$$

то ток, потребляемый схемой, изменяется по закону:

$$i = -aU_m \sin \omega t + bU_m^3 \sin^3 \omega t. \quad (3)$$

Мгновенное значение мощности источника при этом

$$P = ui = -aU_m^2 \sin^2 \omega t + bU_m^4 \sin^4 \omega t, \quad (4)$$

а средняя мощность

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = -\frac{aU_m^2}{2} + \frac{3}{8} bU_m^4. \quad (5)$$

При некоторой амплитуде переменного напряжения

$$(U_m)_0 = 2 \sqrt{\frac{a}{3b}} \quad (6)$$

средняя мощность источника обращается в нуль.

Колебания такой амплитуды поддерживаются за счет энергии электронной схемы, без участия внешнего источника.

Если к клеммам электронной схемы подключено некоторое активное сопротивление R' (пунктир на фиг. 1) то ее вольт-амперная характеристика принимает вид

$$i = \left[-a + \frac{1}{R'} \right] u + bu^3, \quad (7)$$

и амплитуда генерируемого напряжения становится равной

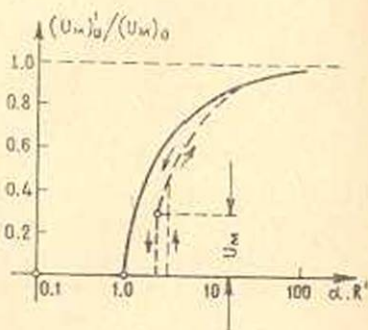
$$(U_m)'_0 = 2 \sqrt{\frac{a - 1/R'}{3b}}. \quad (8)$$

На фиг. 3 изображена зависимость

$$(U_m)'_0 / (U_m)_0 = f(aR'), \quad (9)$$

показывающая, что при аппроксимации (1) схема может генерировать колебания сколь угодно малой амплитуды.

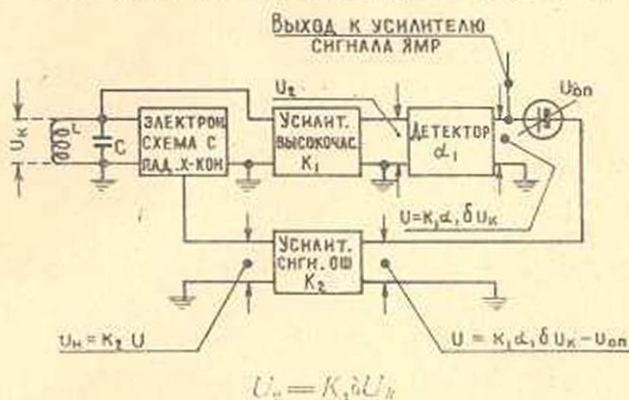
Опыт показывает, что если постепенно уменьшать R' , то при некотором его значении произойдет срыв колебаний, то есть скачкообразное изменение амплитуды от величины U_m до нуля (пунктирная кривая на фиг. 3). По-видимому, начальная часть вольт-амперной характери-



Фиг. 3. Зависимость амплитуды генерируемых колебаний от величины нагрузочного сопротивления.

стики отрицательного сопротивления более соответствует прямой линии [10]. Принципиально напряжение срыва U_n может быть сделано достаточно малым, однако обеспечить устойчивую работу схемы вблизи точки срыва очень трудно.

Для устойчивой генерации небольших (порядка десятков милливольт) напряжений необходима активная стабилизация рабочего режима схемы с помощью глубокой отрицательной обратной связи. Блок-схема автодинного датчика в этом случае примет вид, представленный на фиг. 4. Напряжение на контуре автодина U_k усиливается



Фиг. 4. Функциональная схема автодинного датчика с активной стабилизацией амплитуды генерируемых колебаний.

и детектируется. Получаемое при этом напряжение сравнивается с опорным напряжением U_{on} . Разность

$$U_{co} = K_1 \alpha_1 U_k - U_{on} \quad (10)$$

является в данной системе сигналом ошибки. Она усиливается и вносит необходимое корректирующее действие в электронную схему, возбуждающую контур. Корректирующее напряжение равно

$$U_n = K_2 (K_1 \alpha_1 U_k - U_{on}). \quad (11)$$

Корректирующее действие может быть осуществлено многими путями (изменение анодного напряжения генерирующей лампы; изменение потенциала ее третьей сетки и т. д.). Не рассматривая конкретно какой способ коррекции используется, введем коэффициент коррекции

$$A_k = \frac{dU_k}{dU_n}. \quad (12)$$

В соответствии с общим свойством отрицательной обратной связи [12]

$$\frac{\delta U_k}{\Delta U_k} = \frac{1}{1 + K_1 K_2 \alpha A_k}. \quad (13)$$

Здесь δU_k — изменение генерируемого напряжения под действием некоторого возмущения в системе с замкнутой петлей стабилизирующей обратной связи (фиг. 4).

ΔU_k — изменение генерируемого напряжения под действием того же возмущения в системе без стабилизации.

Уравнение (13) характеризует эффективность стабилизирующей обратной связи. Увеличивая K_1 , K_2 , A_k и α_1 можно достичь сколько угодно жесткой стабилизации амплитуды автодина, однако это затруднит измерение сигналов ЯМР, и, вследствие неизбежного запаздывания в детекторе, может привести к самовозбуждению схемы в целом. Для уточнения структуры и параметров схемы, необходим несколько более подробный ее анализ. Пусть в схеме, представленной на фиг. 4, действует возмущение (например, сигнал ЯМР), которое при разомкнутой петле вызвало бы изменение напряжения на контуре на величину ΔU_k . Мгновенное отклонение U_k от невозмущенного значения обозначим δU_k . Постоянную времени переходных процессов собственно в автодине обозначим τ_a ; постоянную времени переходных процессов в детекторе — τ_g . Усилители будем считать безинерционными. Переходные процессы в замкнутой системе, представленной на фиг. 4, будут описываться следующей системой уравнений:

$$\tau_a \frac{d}{dt} (\delta U_k) + \delta U_k = \Delta U_k - A_k U_n, \quad (14)$$

$$U_2 = K_1 \delta U_k, \quad (15)$$

$$\tau_g \frac{dU_{co}}{dt} + U_{co} = \alpha_1 U_2, \quad (16)$$

$$U_n = K_2 U_{co}. \quad (17)$$

Решение этой системы относительно δU_k дает дифференциальное уравнение переходного процесса

$$\tau_a \tau_g \frac{d^2}{dt^2} (\delta U_k) + (\tau_a + \tau_g) \frac{d}{dt} (\delta U_k) + (1 + A_k \alpha_1 K_1 K_2) \delta U_k = \Delta U_k. \quad (18)$$

В случае синусоидальной модуляции магнитного поля при медленном прохождении линии ЯМР

$$\Delta U_k = (\Delta U_k)_m \sin \omega t. \quad (19)$$

(Предполагается, что ω достаточно мало, и времена ядерной магнитной релаксации могут не учитываться [13]). Из (18) следует, что напряжение на контуре автодина будет изменяться при этом по закону

$$\delta U_k = (\delta U_k)_m \sin (\omega t - \varphi), \quad (20)$$

где

$$(\delta U_k)_m = \frac{(\Delta U_k)_m}{\sqrt{\tau_a^2 \tau_g^2 \omega^4 + (\tau_a^2 + \tau_g^2 - 2\tau_a \tau_g K_1 K_2 A_k \alpha) \omega^2 + (1 + A_k \alpha K_1 K_2)^2}}. \quad (21)$$

Анализ этого выражения показывает, что при возрастании частоты модуляции ω , величина $(\delta U_k)_m$ вначале растет, так как благодаря τ_g

падает эффективность обратной связи. Затем, несмотря на то, что обратная связь практически полностью нейтрализована, величина $(\delta U_k)_m$ будет падать в соответствии с естественными характеристиками автодина. Таким образом, для получения оптимального сигнала необходимо тщательное согласование величины ϕ и τ_k . С другой же стороны, для подавления шумов выгодно увеличивать τ_k . Одним из возможных путей удовлетворения этих противоречивых требований к τ_k может быть использование двух выходов у схемы детектирования: выход с малой величиной τ_k^* для петли стабилизации амплитуды и второй выход — с большой величиной τ_k^* — для сигнала ЯМР.

Очень важным качеством автодина как датчика сигналов ЯМР является его чувствительность. Известны многочисленные попытки дать теоретический анализ факторов, определяющих чувствительность автодина. В этих работах либо содержатся принципиальные ошибки [14], либо вводится очень много допущений [15], сводящих на нет практическую ценность конечных результатов. По-видимому, в отношении нелинейной системы, каковой является электронная схема с падающей вольт-амперной характеристикой, аналитически могут быть сформулированы только самые общие положения и наиболее прямое решение вопроса — эмпирическое. С этой целью в Институте химфизики АН СССР сопоставлялись сигналы ЯМР, полученные с помощью разных схем на разных лампах от данного образца в данном контуре при данной напряженности магнитного поля [16]. Полученные результаты дают основание утверждать, что для автодинных датчиков сигналов ЯМР целесообразно выбирать лампы типов 6ЖЧ, 6П9, 6Ж9П и применять либо схему Колпитца, либо схему на базе каскада с катодной нагрузкой [17]. Многолетний опыт авторов в использовании автодинных схем вполне подтверждает эти выводы.

Изложенные принципы могут быть реализованы весьма многочисленными способами. При выборе окончательного варианта схемы неизбежно приходится принимать во внимание ряд дополнительных факторов (мощность источников питания, габариты схемы, общее тепловыделение, удобство наладки и т. д.). В свете этих дополнительных факторов оптимальным, по нашему мнению, является вариант, представленный на фиг. 5. Автодин (лампа L_1) собран по схеме каскада с катодной нагрузкой; L_2 — усилитель высокой частоты, L_3 — детектор, L_4, L_5 — дифференциальный усилитель низкой частоты). Коррекция амплитуды генерируемого напряжения осуществляется изменением анодного напряжения L_1 . Анодное напряжение L_1 равно анодному напряжению усилительной лампы L_2 минус постоянное напряжение на кремниевых стабилизаторах D_1, D_2, D_3 . Такое „вычитание“ позволяет обеспечить нормальный режим генерации для L_1 при нормальном усилительном режиме L_2 . Величина опорного напряжения регулируется с помощью сопротивления R_y , амплитуда напряжения на контуре контролируется визуально по шкале микроампер-

На фиг. 6 приведены образцы записи линии поглощения Li^{7} в $LiPFAlNa(OH)O_4$ при двух различных ориентациях последнего по отношению к магнитному полю. Измерения, проведенные с помощью автодлинной схемы, представлены на фиг. 5. Эти данные убедительно свидетельствуют о хорошей чувствительности и стабильности измерительной схемы.

Институт химической физики
АН СССР

Поступила 4 XI 1964

Л. Л. ДЕКАБРУН, Ю. Н. КИЛЛЯНОВ, А. Р. МКРТЧЯН

ՄԻՋՈՒՊԱՅԻՆ ՄԱԳՆԵՍԱԿԱՆ ՌԵԶՈՆԱՆՍԻ ԱԶԳԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ԱՎՏՈԴԻՆԱՅԻՆ ՏՎԻԶՆԵՐԻ ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐԻ ՌԵՍՈՆԱՆՍԻՐՈՅՈՑՈՆՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ

Ա մ փ ո Վ ի ո լ մ

Տառանդական կոնտարտ մոտոր մեծությունների տեսչող լարումների գոյության ժամանակ ավաղինային տվիչներն անկայուն են աշխատում, սակայն «Միջուկային մագնիսական ռեզոնանս» (ՄՄՌ) մեթոդի միջոցով պինդ մարմինների ուսումնասիրությունների համար այդ տվիչներն ունեն մի շարք առավելություններ, համեմատած մյուսների հետ, որի պատճառով էլ եւթը մնում է միակը՝ անհրաժեշտ է դառնում կալունացնել զենեւացվող լարման ամպլիտուդան, բարեփոխել ավաղինային տվիչի սինման աշխատանքը, որ նրա աշխատանքային ռեժիմը մոտոր մեծության լարումների զեպրում լինի կայուն:

Հոդվածում տրված է ակտիվ բացասական հակադարձ կապի կալունացնող գործողության, ինչպես և ավաղինային տվիչում անցման երևույթների անալիզը՝ կապված ամպլիտուդների կալունացման հետ, որի հիման վրա էլ ճշգրտված ու բարեփոխված են դառնիլի սինմայի մասերը:

Բնութագրված է ավաղինային տվիչների զգայունության հարցը, որի մասին տեսական անալիզը, հիմնական սինմայի ոչ զծային լինելու հետևանքով, չի կարող տալ որոշակի արդյունքներ: Այդ հարցի լուծման ամենաուղիղ ճանապարհը հանդիսանում է ավաղինի սինմայի և նրա մասերի բաղդատման մեթոդով համապատասխան առկա պայմանների էմպիրիկ ընտրությունը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Cohen T. A. Automatic Liquid Level Controls, Electronics, 1945, Apr.
2. Gorter C., Broer Z. T. Physica, 9, 1942, 591.
3. Blombergen N., Purcell E., Pound R. Relaxation Effects in NMR Absorption, Phys. Rev., 73, №7, Apr. 1948.
4. Bloch F. Nuclear Induction, Phys. Rev., 73, 1948.
5. Pound R., Knight W. A Radiofrequency Spectrometer, Rev. Sc. Instr., 21, 1950, 219.
6. Volkoff G., Petch H., Smellie D. Nuclear Quadrupole Interaction in Single Crystals, Canadian Journ. of Phys., 30, 1952, 270.

7. *Pekarek L., Urbanek J.* Nuclear-ray Paramagnetismus. Československy Časopis pro Fysiku, SVI, čís 3—4.
8. *Balth Van der Pohl.* A Nonlinear Theory of Electrical oscillations. Proc. IRE, 22, № 9, 1934, 1051.
9. *Bruin F., Shimmel F.* Theorie du detecteur autodyne pour la resonance paramagnetique. Physica, 21, 1955, 867.
10. *Декабрун Л. Л.* Регенеративные измерительные датчики. Автоматика и телемеханика, 17, № 12, 1956, 1114.
11. *Мкртчян П.* О новой возможности использования метода ЯМР для изучения разупорядочения в кристаллах. Доклады АН Арм. ССР, 37, № 5, 1963.
12. *Хэммонд П.* Теория обратной связи и ее применения. Физматгиз, М., 1962.
13. *Конферман Р.* Ядерные моменты. ИЛ, М., 1961.
14. *Garstens M. A.* Noise in Non-linear oscillator. Journ. of Appl. Physics, 28, № 3, 352.
15. *Weinholdt H.* Über die Empfindlichkeit des Autodynverfahrens zur Beobachtung magnetisch Kernresonanz. Exper. Techn. der Phys. Heft 6, 1957, 271.
16. *Вьюнникова В.* Дипломная работа, 1957. Физический факультет МГУ им. Ломоносова, Институт химической физики АН СССР.
17. *Декабрун Л. Л.* О самовозбуждении каскадов с катодной нагрузкой. Сборник: "Некоторые вопросы инженерной физики". Машгиз, М., 1957.