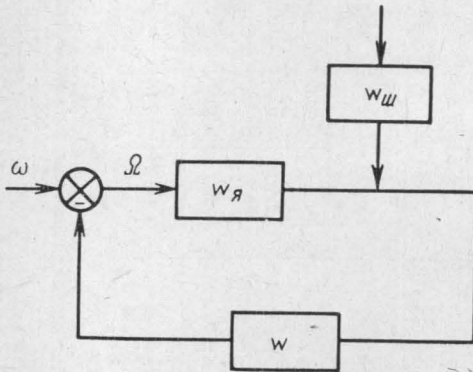


А. Л. КОТКИН

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СПИНОВЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ

Идея использования сигнала ЯМР для стабилизации резонансных условий была высказана в 1948 г. [1]. В настоящее время пассивные спиновые стабилизаторы (СС) нашли широкое применение в каналах стабилизации спектрометров ЯМР высокого разрешения. В них [2, 3] в качестве сигнала ошибки используется напряжение пропорциональное сигналу дисперсии (будем их называть (ССД)). В [4] было предложено в качестве сигнала ошибки использовать напряжение пропорциональное фазовому сдвигу на сигнале ЯМР (назовем их ССФ) или отношению сигналов  $U$  и  $V$  ( $U$  и  $V$  — блоховские сигналы дисперсии и поглощения (ССО)). В [4] указывалось на разницу статических характеристик и диапазонов работы этих видов СС при широкополосном радиотракте. Настоящая работа посвящена сравнению статических, динамических и статистических характеристик СС различных видов.



Условия рассмотрения. Структурная схема СС представлена на рисунке, где обозначено  $\omega$  ( $\text{сек}^{-1}$ ) — внешняя расстройка;  $\Omega$  ( $\text{сек}^{-1}$ ) — внутренняя расстройка, ошибка стабилизатора,  $W_{\text{я}}$  ( $\text{в/сек}^{-1}$ ) — передаточная функция системы ядерных спинов,  $W$  ( $\text{сек}^{-1}/\text{в}$ ) — передаточная функция радиотракта,  $W_{\text{ш}}$  — передаточная функция для шумового напряжения приемного радиоконтра.

Основной внутренней причиной статистических ошибок СС является тепловая шум приемного радиоконтра. В ССД шумовое напряжение приложено непосредственно к выходу блока с передаточной функцией  $W_{\text{я}}$  и поэтому  $W_{\text{ш}}^D = 1$ .

В ССФ и ССО сигнал ошибки пропорционален величине  $\text{arctg } U/V$  и  $U/V$ . При этом можно считать шумовое напряжение включенным параллельно напряжениям сигналов  $u$  и  $v$ , а напряжение шума на выходе блока с передаточной функцией  $W_{\text{я}}$  будет пропорционально

$$W_{\text{ш}}^{\Phi} = \frac{1}{\sqrt{U_0^2 + V_0^2}}, \quad W_{\text{ш}}^0 = \frac{|u| + |v|}{v^2}.$$

Будем рассматривать работу СС в однородном магнитном поле при расстройках, близких к нулевым, т. е.  $\Omega = 0$ . При этом условия

$$W_{\text{я}}^D = \frac{\gamma H, M_0}{\delta^2 + \gamma^2 H_1^2} \frac{\delta}{s + \delta} \quad (\text{в/сек}^{-1}),$$

$$W_{\text{я}}^0 = W_{\text{я}}^{\Phi} = \frac{1}{s + \delta} \quad (\text{в/сек}^{-1}),$$

где  $s$  — оператор Лапласа,  $\delta$  — величина, обратная времени релаксации ядер  $T_1 = T_2$ ,  $\gamma$  — гиромагнитное отношение ядер,  $H_1$  — амплитуда действующего поля в рассматриваемом резонансе,  $M_0$  — намагниченность системы ядер.

В [5] было показано, что передаточная функция системы ядерных спинов при наличии дополнительной модуляции отличается от таковой без дополнительной модуляции заменой  $H_1$  на действующее радиопле в данном резонансе и постоянным множителем. Эти отличия в данной задаче не являются принципиальными, поэтому, не уменьшая общности, рассмотрим работу устройств без дополнительной модуляции.

Радиосхему можно считать широкополосной, за исключением одного звена, например, синхронного детектора. Работа ведется без интегратора. В этом случае радиотракт представляется передаточной функцией

$$W = \frac{k\delta_1}{s + \delta_1} \text{ (сек}^{-1}\text{e)},$$

где  $k$  — статический коэффициент усиления,  $\delta_1$  — обратная постоянная времени радиотракта.

**Характеристики СС.** СС можно характеризовать рядом параметров: статический коэффициент стабилизации, быстродействие или полоса пропускания входного сигнала, полоса пропускания шумового сигнала.

Статический коэффициент усиления  $K_0$  в случае  $K_0 \gg 1$  записывается в виде [6]

$$K_0 = W_{\text{я}}(0) W(0).$$

Полоса пропускания полезного сигнала спиновым стабилизатором приблизительно равна частоте среза логарифмической амплитудной характеристики разомкнутого стабилизатора [6]

$$\Delta f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K_0 \delta \delta_1}.$$

Полоса пропускания шумового воздействия со стороны приемного контура определяется выражением [7]

$$\Delta f_{\text{ш}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{W_{\text{ш}} W}{1 + W W_{\text{я}}} \right|^2 d\omega.$$

Все полученные характеристики приведены в таблице.

	ССД	ССФ	ССО
$K_0$	$\frac{(kV)}{\delta}$	$\frac{k}{\delta}$	$\frac{k}{\delta}$
$\Delta f_c$	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{(kV) \delta_1}$	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{k \delta_1}$	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{k \delta_1}$
$\Delta f_{\text{ш}}$	$\frac{(kV)^2}{2V^2} \cdot \frac{\delta_1^2}{\delta + \delta_1} \left( 1 + \frac{\delta^2}{\delta \delta_1 + (kV) \delta_1} \right)$	$\frac{k^2}{2V^2} \cdot \frac{\delta_1^2}{\delta + \delta_1} \left( 1 + \frac{\delta^2}{\delta \delta_1 + k \delta_1} \right)$	$\frac{k^2}{2V^2} \cdot \frac{\delta_1^2}{\delta + \delta_1} \left( 1 + \frac{\delta^2}{\delta \delta_1 + k \delta_1} \right)$

**Обсуждение.** Как видно из таблицы, если сделать  $(kV)$  в ССД равным  $k$  в ССФ или ССО, то все характеристики СС совпадают. Таким образом, при расстройках, близких к нулевым, все рассмотренные виды СС описываются одними и теми же уравнениями и обладают одинаковыми статическими, динамическими и статистическими характеристиками. Надо отметить, что в случае, когда собственные шумы стабилизатора не являются определяющими, предпочтительнее ССФ или ССО, так как статические и динамические характеристики этих стабилизаторов не зависят от  $H_1$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Раскард М. Е. Rev. Sci. Instr., 19, 433, 1948.
2. Проспект спектрометра JNM-3H-60, фирмы «JEOL», 1963.
3. Сюзис А., Липпмаа Э. «Изв. АН ЭССР», 14, № 1, 81, 1962.

4. Умарходжаев Р. М., Коткин А. Л. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 13, № 5, 1972.
5. Коткин А. Л., Умарходжаев Р. М. «Изв. вузов», радиофизика, № 12, 1971.
6. Теория автоматического регулирования под ред. В. В. Солодовникова. М., «Машиностроение», 1967.
7. Бесекерский В. А. Динамический синтез систем автоматического регулирования. М., «Наука», 1970.

Поступила в редакцию  
20.12 1971 г.

НИИЯФ

УДК 621.385.624

Е. И. ВАСИЛЬЕВ, В. И. КАНАВЕЦ, В. М. ЛОПУХИН

## ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ И ЭЛЕКТРОННЫЙ к. п. д. ВЫХОДНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИБОРОВ С ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

В настоящее время расчеты электронного к.п.д. приборов СВЧ с электронным пучком проводятся по разности кинетических энергий без учета потенциальной энергии. В то же время оценки показывают, что переход кинетической энергии в потенциальную в ряде случаев определяет оптимальные параметры приборов [1] и может уменьшить к.п.д. [2]. Энергообмен с высокочастотным полем в этих работах не рассматривался. Ниже сообщаются результаты исследования такого энергообмена в выходном устройстве с одним высокочастотным зазором. Описан метод расчета к.п.д. в одномерном приближении с учетом потенциальной энергии сгустка. Показано, что при изменении этой энергии к.п.д. резонатора может как уменьшаться, так и увеличиваться.

Закон сохранения энергии для вихревого поля, взаимодействующего с электронным пучком в объеме  $V$ , ограниченном замкнутой поверхностью  $S$ , записывается в следующем виде:

$$\int_V \vec{j} \vec{E}_B d\tau = -\frac{\partial U}{\partial t} - P_B, \quad (1)$$

где  $\vec{j}$  — плотность тока,  $\vec{E}_B$  — напряженность вихревого поля,  $U$  — его энергия,  $P_B$  — мгновенная мощность вихревого поля, теряющаяся в стенках и поступающая в нагрузку.

Общая мощность взаимодействия определяется изменением кинетической энергии [3]

$$\int_V \vec{j} \vec{E} d\tau = \frac{\partial T}{\partial t} + \oint_S \omega_k \vec{v} d\sigma, \quad (2)$$

где  $\omega_k$  — плотность кинетической энергии,  $\vec{v}$  — скорость электронов,  $T$  — кинетическая энергия в объеме  $V$ , ограниченном поверхностью  $S$ ;  $\vec{E} = \vec{E}_B + \vec{E}_n$ ,  $E_n$  — напряженность электростатического поля пространственного заряда,  $E_n$  вычисляется в предположении кулоновской калибровки потенциалов.

Изменение потенциальной энергии одного электрона дается соотношением

$$\frac{d\omega_{ne}}{dt} = -e\vec{E}_n \vec{v}. \quad (3)$$

После умножения на плотность числа электронов  $n$  и преобразований, аналогичных сделанным в (3) при получении (2), левая часть (3) запишется в виде

$$n \frac{d\omega_{ne}}{dt} = \frac{\partial (n\omega_{ne})}{\partial t} + \text{div} (\vec{v} n\omega_{ne}). \quad (4)$$