

В. А. ПОГРИБНОЙ, В. М. ФЕДотов

(Львов)

**РАБОТА МАГНИТНЫХ МОДУЛЯТОРОВ
ТИПА ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ
В СХЕМАХ КОМБИНИРОВАННЫХ
АНАЛОГО-КОДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

В настоящее время в цифровой технике находят применение комбинированные аналого-кодовые преобразователи [1]. Они содержат в каждом разряде нуль-орган или блок алгебраического суммирования, в качестве которых оказалось весьма удобным применять магнитные модуляторы типа второй гармоники [2—5].

Такие устройства производят сравнение величины сигнала и компенсирующих величин в виде ампервитков, обладают низким порогом чувствительности и малым дрейфом нуля. В то же время к таким нуль-органам и блокам алгебраического суммирования предъявляется дополнительное требование: они должны обладать значительным динамическим диапазоном, величина которого связана с максимальным количеством дискретных состояний аналого-кодового преобразователя.

В связи с тем, что нуль-органы и блоки алгебраического суммирования для комбинированных аналого-кодовых преобразователей часто строятся по схеме: модулятор — усилитель — фазочувствительный демодулятор [4, 5], на работу таких схем большое влияние оказывают амплитудная и фазовая зависимости выходного напряжения второй гармоники магнитного модулятора от величины входного сигнала во всем диапазоне его изменения, так как в некоторые моменты времени, вследствие наличия запаздывания в схеме компенсации, магнитные модуляторы находятся под воздействием номинальной величины входного сигнала.

Для получения линейной зависимости амплитуды выходной второй гармоники от величины входного сигнала во всем диапазоне его изменения необходимо модулятор, работающий в качестве блока алгебраического суммирования, возбуждать от генератора достаточной мощности в перевозбужденном режиме, близком к режиму заданного напряжения, т. е. при небольшом значении сопротивления цепи возбуждения. Именно этот режим возбуждения наиболее часто применяется, так как обеспечивает наилучшие метрологические показатели [6, 7].

Для возбуждения модуляторов удобно применять генераторы прямоугольных колебаний с LC -контуром в базовой цепи [8].

Выявим амплитудную и фазовую зависимости выходного напряжения от величины входного сигнала магнитного модулятора второй гар-

моника, собранного на двух сердечниках по дифференциальной схеме (рис. 1).

Режим возбуждения модулятора, близкий к режиму напряжения, осуществляется от генератора прямоугольных колебаний. Магнитный модулятор содержит обмотки возбуждения W_b , управления W_y и выходную W_u . Для вывода амплитудной и фазовой зависимостей выходного напряжения магнитного модулятора второй гармоники от величины входного сигнала будем пользоваться кусочно-ломанной аппроксимацией зависимости $B=f(H)$ (рис. 2).

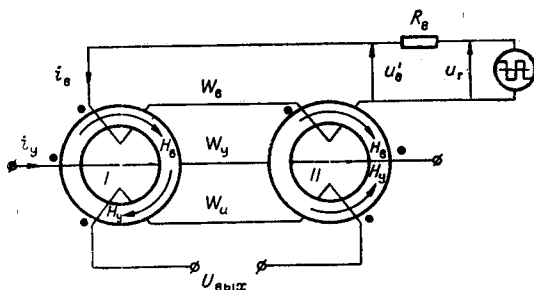


Рис. 1.

от величины сигнала управления H_y , а на рис. 2, в — аналогичная зависимость разностной индукции $\Delta B = B_I - B_{II}$. На рис. 2, г, д приведены временная зависимость индукции ΔB и форма кривой выходного напряжения магнитного модулятора за полпериода с учетом действия сигнала H_y .

Напряжение генератора u_r описывается выражением

$$u_r = \begin{cases} +U_m & \text{для } 0 < \psi \leq \pi; \\ -U_m & \text{для } \pi < \psi \leq 2\pi, \end{cases} \quad (1)$$

где $\psi = \omega t$.

Индуктированное в обмотках возбуждения W_b напряжение при условии, что $R_b = 0$ и наличии сигнала управления (идеальный режим напряжения) или, что равносильно, при $R_b \neq 0$ и сигнале управления $H_y = \frac{i_y W_y}{I_c} \rightarrow 0$ (линейное сопротивление цепи возбуждения пренебрежимо мало по сравнению с нелинейным индуктивным сопротивлением обмотки возбуждения) равно

$$u_b = \begin{cases} +U_m & \text{для } 0 < \psi \leq \psi_s; \\ 0 & \text{для } \psi_s < \psi \leq \pi; \\ -U_m & \text{для } \pi < \psi \leq \pi + \psi_s; \\ 0 & \text{для } \pi + \psi_s < \psi \leq 2\pi, \end{cases} \quad (2)$$

где ψ_s — угол насыщения сердечников магнитного модулятора.

При условии, что $R_b \neq 0$ и за счет действия сигнала управления H_y при ненасыщенном состоянии сердечников по цепи возбуждения протекает ток, вызывающий падение напряжения на R_b (см. рис. 2, а),

$$u'_b = \begin{cases} +(U_m - i_b R_b) & \text{для } 0 < \psi \leq \psi'_s; \\ 0 & \text{для } \psi'_s < \psi \leq \pi; \\ -(U_m - i_b R_b) & \text{для } \pi < \psi \leq \pi + \psi'_s; \\ 0 & \text{для } \pi + \psi'_s < \psi \leq 2\pi. \end{cases} \quad (3)$$

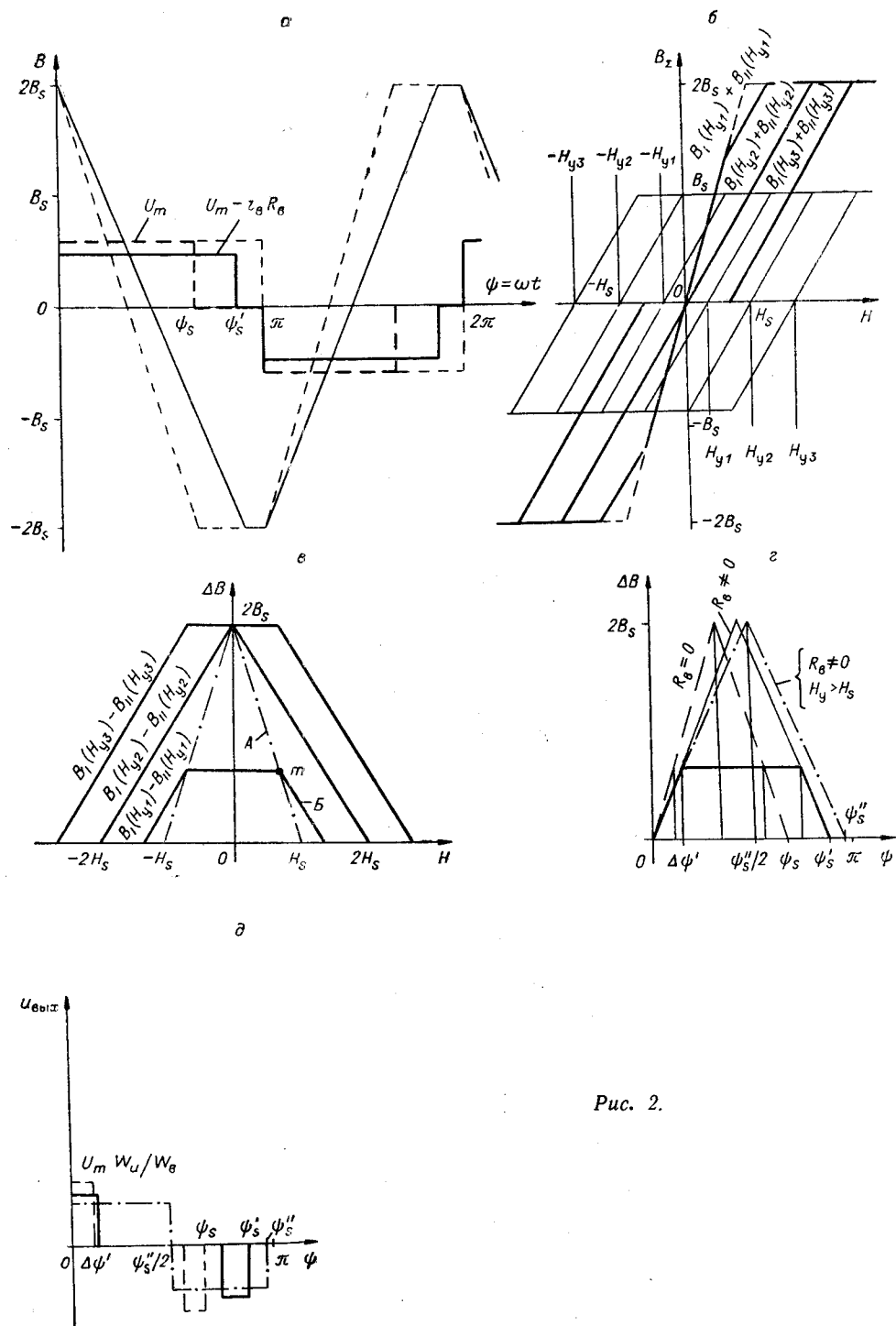


Рис. 2.

Магнитный модулятор второй гармоники в случае ненасыщенных сердечников работает, как идеальный трансформатор. Поэтому для него справедливо равенство

$$i_{\text{в}} = \pm I_{\text{у}} \frac{W_{\text{у}}}{W_{\text{в}}}. \quad (4)$$

Тогда выражение для индукции в сердечниках в зависимости от величины возбуждающего напряжения и сигнала $H_{\text{у}}$ в интервале $0 < \psi \leq \psi'_s$ будет иметь вид

$$B(\psi) = -\frac{1}{\omega W_{\text{в}} S_{\text{с}}} \int_0^{\psi} u'_{\text{в}} d\psi + C = -\frac{U_{\text{м}} - i_{\text{в}} R_{\text{в}}}{\omega W_{\text{в}} S_{\text{с}}} \psi + 2 B_s. \quad (5)$$

Отсюда находим предельное значение тока управления, при котором еще работает магнитный модулятор:

$$i_{\text{у max}} = \frac{W_{\text{в}}}{R_{\text{в}} W_{\text{у}}} \left(\frac{4}{\pi} B_s \omega W_{\text{в}} S_{\text{с}} - U_{\text{м}} \right); \quad (6)$$

при этом фаза насыщения ψ'_s будет равна

$$\psi'_s = \frac{4 B_s \omega W_{\text{в}} S_{\text{с}}}{U_{\text{м}} - i_{\text{у}} \frac{W_{\text{у}}}{W_{\text{в}}} R_{\text{в}}}. \quad (7)$$

Найдем интервалы существования импульсов э. д. с. в выходной обмотке $W_{\text{в}}$. Согласно рис. 2, в, при величине сигнала $H_{\text{у}} \leq H_s$ получим уравнение асимптоты А

$$\Delta B = 2 B_s \left(1 - \frac{H}{H_s} \right) \quad (8)$$

и уравнение линии Б

$$\Delta B = B_s \left(1 + \frac{H_{\text{у}}}{H_s} - \frac{H}{H_s} \right). \quad (9)$$

Для их общей точки m :

$$H_m = H_s - H_{\text{у}}; \quad \Delta B_m = 2 B_s \frac{H_{\text{у}}}{H_s}. \quad (10)$$

Тогда из рис. 2, г следует:

$$\frac{4 B_s}{\psi'_s} = \frac{\Delta B_m}{\Delta \psi'}; \quad \Delta \psi' = \frac{H_{\text{у}}}{2 H_s} \psi'_s. \quad (11)$$

При величине сигнала $H_{\text{у}} > H_s$ индукция будет иметь значение $\Delta B = 2 B_s$

$$\Delta \psi' = \frac{\psi'_s}{2}. \quad (12)$$

Компоненты $2p$ -гармоник напряжения на зажимах выходной обмотки $W_{\text{в}}$ под действием сигнала $H_{\text{у}}$ в режиме холостого хода равны:

а) косинусная компонента

$$\begin{aligned} u_{u(2p)c} &= \frac{2 W_{\text{в}}}{\pi W_{\text{в}}} u'_{\text{в}} \left[\int_0^{\Delta \psi'} \cos 2p \psi d\psi - \int_{\psi'_s - \Delta \psi'}^{\psi'_s} \cos 2p \psi d\psi \right] = \\ &= \frac{k_1(i_{\text{у}})}{2p} [\sin 2p \Delta \psi' - \sin 2p \psi'_s + \sin 2p (\psi'_s - \Delta \psi')], \quad (13) \end{aligned}$$

где

$$k_1(i_y) = \frac{2 W_u u'_B}{\pi W_B};$$

б) синусная компонента

$$u_{u(2p)s} = k_1(i_y) \left[\int_0^{\Delta \psi'} \sin 2p \psi d\psi - \int_{\psi'_s - \Delta \psi'}^{\psi'_s} \sin 2p \psi d\psi \right] =$$

$$= \frac{k_1(i_y)}{2p} [1 - \cos 2p \Delta \psi' + \cos 2p \psi'_s - \cos 2p (\psi'_s - \Delta \psi')]. \quad (14)$$

Модуль выходного напряжения

$$U_{u(2p)} = \sqrt{u_{u(2p)s}^2 + u_{u(2p)c}^2}. \quad (15)$$

Фаза выходного сигнала

$$\varphi_{(2p)} = \text{arctg} \frac{u_{u(2p)c}}{u_{u(2p)s}} =$$

$$= \text{arctg} \frac{\sin 2p \Delta \psi' - \sin 2p \psi'_s + \sin 2p (\psi'_s - \Delta \psi')}{1 - \cos 2p \Delta \psi' + \cos 2p \psi'_s - \cos 2p (\psi'_s - \Delta \psi')}; \quad (16)$$

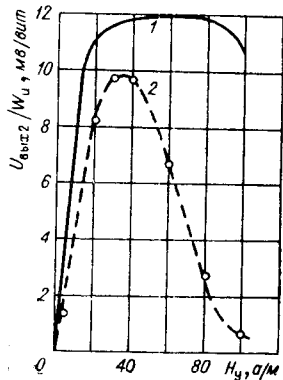
при $\Delta \psi \rightarrow 0$

$$\varphi_{0(2p)} \approx \text{arctg} \frac{1 - \cos 2p \psi_s}{-\sin 2p \psi_s} = -\psi_s. \quad (17)$$

Изменение фазы выходного напряжения под действием сигнала управления по сравнению с идеальным режимом напряжения равно

$$\Delta \varphi_{(2p)} = \varphi_{(2p)} - \varphi_{0(2p)}. \quad (18)$$

На рис. 3 и 4 сплошными линиями 1 показаны соответственно амплитудная и фазовая зависимости выходного напряжения второй гармоники от величины сигнала управления H_y , построенные по приведен-



← Рис. 3.

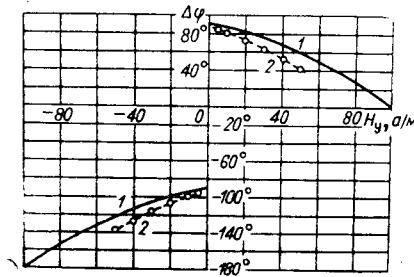


Рис. 4.

ным выше выражениям для магнитного модулятора типа второй гармоники со следующими данными: $W_B = 300$ вит, $W_y = 2000$ вит, $W_u = 100$ вит; сердечники из набора пластин пермаллоя 79НМ, прошедшего термообработку в водородной среде, сечением $S_c = 12 \cdot 10^{-7}$ м², $l_c = 0,1$ м. Воз-

буждение магнитного модулятора осуществлялось от генератора прямоугольных колебаний с $U_m = 10$ в через $R_b = 150$ ом; частота возбуждения составляла $\omega = 2\pi f = \pi \cdot 10^4$, при которой $B_s \approx 0,65$ тл. По расчету для этого случая предельное значение тока управления $i_{y, \max} = 5$ ма, а экспериментальное значение около 3,5 ма.

С целью экспериментальной проверки результатов, полученных выше аналитически, была собрана установка, блок-схема которой представлена на рис. 5: ММ2Г — магнитный модулятор второй гармоники, данные которого приведены выше; $L_{др}$ — дроссель, предотвращающий замыкание напряжения второй гармоники через сопротивление

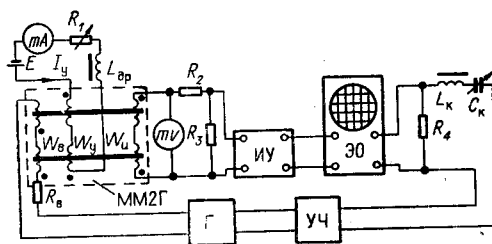


Рис. 5.

источника сигнала в цепи обмотки управления; mA — прибор, измеряющий ток в цепи обмотки управления, протекающий от источника постоянного напряжения E через регулируемое сопротивление R_1 ; mV — селективный приемник, измеряющий напряжение второй гармоники; R_2 и R_3 — сопротивления делителя, соответственно 9 ком и 1 ком, что обеспечивает режим работы измерительной обмотки модулятора, близкий к режиму холостого хода; ИУ — избирательный усилитель с малым входным сопротивлением; ЭО — электронный осциллограф; $L_k C_k$ — последовательный контур, настроенный на частоту напряжения второй гармоники; УЧ — удвоитель частоты, генерирующий напряжение частоты второй гармоники, когерентное с выходным напряжением генератора Г. Значение фазы выходного напряжения второй гармоники измерялись с помощью фигур Лиссажу.

Полученные экспериментально амплитудная и фазовая зависимости выходного напряжения второй гармоники от величины H_y показаны соответственно на рис. 3 и 4 штриховыми линиями. Некоторое несоответствие расчетных и экспериментальных кривых можно объяснить тем, что принятая аппроксимация не точно передает характер зависимости $B(H)$.

Таким образом, на основе изложенной методики можно:

1) установить максимально возможную величину тока управления, что необходимо для расчета магнитного модулятора второй гармоники, работающего в составе нуль-органов или блоков алгебраического суммирования комбинированного аналого-кодового преобразователя;

2) исходя из заданной погрешности усиления магнитного модулятора, работающего в системе модулятор — усилитель — демодулятор, выбрать диапазон усиливаемых сигналов для конкретного модулятора или по заданной погрешности и динамическому диапазону определить необходимые параметры магнитного модулятора типа второй гармоники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. И. Павлюк, В. А. Погрибной. К вопросу классификации аналого-кодовых прерывноизменяющихся величин в цифровом коде. — Вычислительная техника, 1959, измерительной информации». Киев, «Наукова думка», 1967.
2. А. М. Хазен. Вопросы построения систем коммутации и преобразования в цифровой эквивалент сигналов постоянного тока низкого уровня мощности. — Автометрия, 1966, № 4.
3. А. М. Хазен. Магнитные элементы в электронике. М., «Знание», 1968.

4. Б. И. Блажкевич, В. Ю. Воробкевич, Э. И. Павлюк, В. А. Погрибной. Следящий аналого-кодовый преобразователь на магнитных модуляторах второй гармоники.— Автометрия, 1969, № 1.
5. Б. И. Блажкевич, В. А. Погрибной, М. А. Раков. Цифровой вольтметр на многоустойчивых элементах. Авторское свидетельство № 241534.— ОИПОТЗ, 1969, № 14.
6. Р. Я. Беркман, В. М. Федотов. Анализ работы магнитных модуляторов типа четных гармоник в перевозбужденном режиме заданного напряжения.— В сб. «Расчет и измерение информационных параметров электромагнитных полей». Киев, «Наукова думка», 1967.
7. Р. Я. Беркман, Б. Л. Бондарук. О стабильности чувствительности магнитных модуляторов второй гармоники в зависимости от режима работы возбуждающей и измерительной цепей.— В сб. «Вопросы теории электрических цепей для преобразования измерительной информации». Киев, «Наукова думка», 1967.
8. Измерительные преобразователи постоянного тока. Под. ред. Л. А. Синицкого. Киев, «Наукова думка», 1965.

*Поступила в редакцию
22 сентября 1969 г.,
окончательный вариант —
10 марта 1970 г.*
