

УДК 621.317:681.586

Ю.К. Сопин,

П.С. Пашенко

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ХОЛЛА

Рассматривается преобразователь Холла в режимах холостого хода, короткого замыкания и мультиплексирования измерительной цепи. Построены математические модели преобразователя в указанных режимах, исследованы его статические и динамические характеристики.

Преобразователи Холла (ПХ) являются чувствительными элементами датчиков физических величин (параметров движения, частоты вращения, расхода жидкости, геометрии объектов, их положения в пространстве и т.п.). Эти датчики используются для автоматизации различных технологических процессов: геологоразведка, дефектология, бесконтактное измерение тока, автоматизированный контроль параметров магнитных материалов, формы и объема объектов и т. д.

Принцип действия ПХ основан на *гальваномагнитных эффектах*, возникающих в твердых телах, находящихся в магнитном поле при движении в них *заряженных частиц*. К гальваномагнитным эффектам относятся следующие [1]:

эффект Холла – возникновение *поперечной разности потенциалов* E_x – *электродвижущей силы* (ЭДС) Холла, формирующейся на краях *электропроводной пластины* с *продольным током* I_0 , помещенной в *магнитное поле* с *индукцией* B ;

эффект Гаусса – *изменение продольного сопротивления проводника* R_{np} под действием внешнего магнитного поля;

эффект Эттингсгаузена – возникновение в магнитном поле *поперечной разности температур*, порождающей *термо-ЭДС* E_θ ;

эффект Нернста – *Эттингсгаузена* – возникновение в магнитном поле *поперечной разности потенциалов* E_n (термо-ЭДС) при наличии *продольного теплового потока*;

эффект Риги – *Ледюка* – возникновение в магнитном поле *поперечной термо-ЭДС* E_p при наличии *продольного градиента температур*.

Эффект Холла характеризуется *малой инерционностью*, что обуславливает теоретически высокую *верхнюю граничную частоту* ω_{xp}^{nx} преобразователя: $\omega_{xp}^{nx} = (\tau_p)^{-1}$, где $\tau_p = \epsilon \epsilon_0 \rho_n$ – время электрической релаксации; ϵ, ρ_n – соответственно относительная диэлектрическая проницаемость и удельное сопротивление материала преобразователя; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная (для используемых материалов $\tau_\delta = 10^{-11} \dots 10^{-13} \text{ с}$). В динамическом магнитном поле на выходе ПХ формируются «паразитные» сигналы, связанные с «*наведенным*» *магнитным полем* и *вихревыми токами*, приводящими к *дополнительному разогреву* пластины преобразователя. По отношению к эффекту Холла «*побочные*» гальваномагнитные процессы являются «*тепловыми шумами*», которые обуславливают нелинейность функции преобразования и температурную погрешность [2].

На погрешность преобразователя Холла существенно влияет *режим считывания* информационного параметра E_x . Традиционными режимами работы измерительной цепи ПХ являются *режимы холостого хода* и *фиксированной нагрузки*. В режиме холостого хода при отсутствии внешнего магнитного поля ($B=0$) на выходе ПХ формируется *остаточное напряжение* U_0 , связанное с *неэквипотенциальностью* измерительных электродов, а *режим нагрузки* обуславливает *нелинейность функции преобразования* [1, 2].

Указанные выше факторы, в совокупности, обуславливают нестабильность статического коэффициента преобразования ПХ, уменьшение его динамического диапазона, разрешающей способности и метрологической надежности.

Одним из путей преодоления этих ограничений является использование преобразователя Холла в *режиме мультиплексирования* (МП) измерительной цепи. Данный режим реализуется при *временном разделении режимов холостого хода* (ХХ) и *короткого замыкания* (КЗ) измерительных электродов.

В настоящее время отсутствуют *математические модели преобразователя Холла* в режимах КЗ и МП, что ограничивает его функциональные возможности.

Целью данной работы является построение обобщенных математических моделей преобразователя Холла в режимах холостого хода, короткого замыкания и мультиплексирования измерительных электродов, а также исследование этих режимов.

На рисунке 1, а, б, в изображены функциональные схемы преобразователя Холла в режиме мультиплексирования.

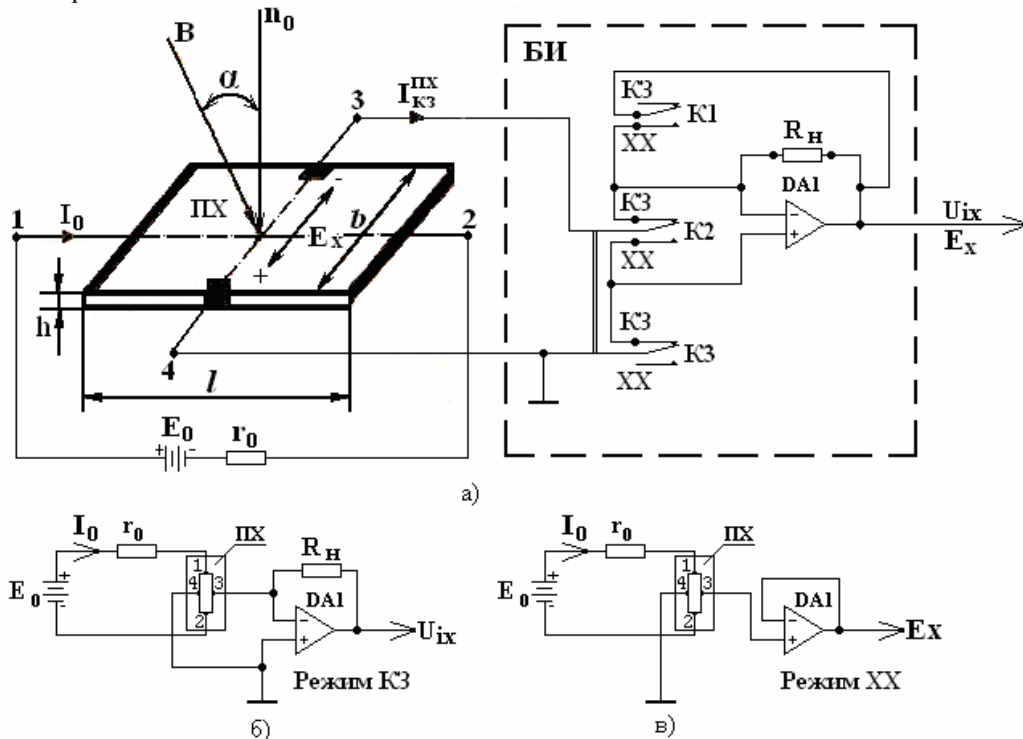


Рисунок 1 – Функциональные схемы преобразователя Холла в режиме мультиплексирования

ПХ представлен в виде *плоской полупроводниковой пластины с электронной проводимостью*, имеющей длину l , ширину b и толщину h . Под углом α к нормали n_0 на пластину действует внешнее магнитное поле с индукцией B (рисунок 1, а). *Токовые электроды 1, 2* через ограничивающий резистор r_0 подключаются к внешнему источнику питания E_0 , формирующему продольный ток I_0 , а *измерительные электроды 3, 4* – к блоку измерения (БИ), который включает операционный усилитель DA1 и три аналоговых коммутатора с контактами K1, K2, K3 соответственно. В *верхнем положении* контактов операционный усилитель (ОУ) является *преобразователем ток – напряжение* (ПТН): электроды 3, 4 подключены к *дифференциальным входам* ОУ, охваченного резистивной отрицательной обратной связью через резистор $R_{oc} \equiv R_n$. В силу *эквипотенциальности* дифференциальных входов, обеспечивается режим КЗ измерительной цепи, а напряжение U_{ix} на выходе ПТН пропорционально *току короткого замыкания* I_{K3}^{nx} преобразователя Холла: $U_{ix} = -I_{K3}^{nx} R_n$ (рисунок 1, а, б). В *нижнем положении* контактов ОУ является *повторителем напряжения* (ПН): коммутатор K1 замыкает резистор R_n , а коммутаторы K2, K3 подключают электроды 3, 4 относительно земли к *неинвертирующему входу* ОУ, охваченного *отрицательной обратной связью* ($R_{oc} \equiv R_n = 0$). В силу высокого входного импеданса ОУ обеспечивается *режим ХХ* измерительной цепи ПХ, а на выходе ПН с единичным коэффициентом передачи формируется информационный сигнал E_x (рисунок 1, а, в) [3].

Рассмотрим физические процессы, формирующие информационный сигнал преобразователя Холла при изменении режимов работы его измерительной цепи.

В рамках известной модели преобразователя Холла, работающего в режиме ХХ, возникновение *поперечной ЭДС* Холла обусловлено отклонением траекторий движения носителей заряда (*электронов*) под действием силы Лоренца F_L [4]

$$F_L = e[\vec{V} \times \vec{B}_n] = eVB_n = eVB \cos \alpha, \quad (1)$$

где $e, \vec{V}$ – соответственно элементарный заряд электрона и вектор средней продольной скорости его движения; $B_n = B \cos \alpha$ – проекция вектора B на нормаль n_0 (рисунок 1, а).

Сила F_L обуславливает между поперечными гранями пластины неоднородность *средней концентрации* $\bar{n}$ электронов, что порождает *поперечное* электрическое поле с напряженностью $E_b = E_x/b$ – поле Холла. Процесс накопления зарядов на поперечных гранях пластины будет происходить до тех пор, пока сила F_L , действующая на электроны под действием магнитного поля с индукцией B , не уравнивает силу Кулона $F_k = eE_b$.

Для электрических зарядов одного знака (электронов) силы Лоренца и Кулона *противоположны по направлению*. Следовательно, условие равновесия сил имеет вид:

$$e[\vec{V} \times \vec{B}_n] = eVB \cos \alpha = eE_b = e\mu_e E_l B_n. \quad (2)$$

Здесь $V = I_0/e\bar{n}bh = j_0/e\bar{n}$, $E_l = j_0/e\bar{n}\mu_e$ – напряженность *продольного* электрического поля внешнего источника; $j_0 = I_0/bh$ – плотность продольного тока; μ_e – подвижность электронов.

Из уравнений (1), (2) получены характеристические параметры преобразователя Холла *в режиме холостого хода*: функция преобразования $E_x = \Phi(B_n)|_{I_0=const}$, статический коэффициент преобразования (магнитная чувствительность) $K_{np}^{xx} = E_x/B_n|_{I_0=const}$, удельная чувствительность $\gamma_{xx} = E_x/I_0 B_n$ [4]

$$\begin{cases} E_x = (R_h/h)I_0 B_n = \gamma_{xx}I_0 B_n; \\ K_{np}^{xx} = \gamma_{xx}I_0; \\ \gamma_{xx} = \gamma_0 = R_h/h, \end{cases} \quad (3)$$

где $R_h = (\bar{n}e)^{-1}$ – коэффициент Холла; γ_0 – удельная чувствительность идеального ПХ бесконечной длины с точечными электродами.

Система (3) описывает *статическую модель генераторного преобразователя Холла в режиме холостого хода*.

Рассмотрим режим короткого замыкания измерительной цепи преобразователя Холла (рисунок 1, а, б).

В *статическом режиме* ($B = const$; $I_0 = const$) общий ток короткого замыкания $I_{кз}^{nx}$ преобразователя Холла определяется выходным сопротивлением R_{34} и совокупностью указанных выше гальваномагнитных эффектов: $I_{кз}^{nx} = (E_x + E_g + E_n + E_p + U_0)/R_{34}$, где $R_{34} = k\rho_n(b/lh)$; k – коэффициент неравномерности распределения тока I_0 по сечению пластины ПХ. Если *токовые электроды* 1, 2 распределены *равномерно* по ширине b поперечных граней (рисунок 1, а), то коэффициент $k \approx 1$ [2, 4].

Из системы (3) определяется ток короткого замыкания $I_{кз}^x$, обусловленный *эффектом Холла*

$$I_{кз}^x = E_x/R_{34} = R_h(\gamma_n l/kb)I_0 B_n = (\mu_e l/kb)I_0 B_n, \quad (4)$$

где $\gamma_n = e\bar{n}\mu_e$ – удельная проводимость полупроводниковой пластины.

В рамках статической модели (4) вводятся характеристические параметры короткозамкнутого преобразователя Холла: функция преобразования $U_{ix} = \Phi(B_n)|_{I_0=const}$, магнитная чувствительность

$K_{np}^{K3} = U_{ix}/B_n|_{I_0=const}$, удельная чувствительность $\gamma_{K3} = U_{ix}/I_0 B_n$

$$\begin{cases} U_{ix} = -I_{кз}^x R_n = -\gamma_{K3}I_0 B_n; \\ K_{np}^{K3} = \gamma_{K3}I_0; \\ \gamma_{K3} = (\mu_e l/kb)R_n. \end{cases} \quad (5)$$

Знак *минус* в первом уравнении системы (5) свидетельствует о том, что в *статическом режиме* информационный сигнал U_{ix} и магнитная индукция B_n сдвинуты на угол π .

Система (5) описывает *статическую модель генераторного преобразователя Холла в режиме короткого замыкания*.

Сравнительный анализ статических моделей (3), (5) свидетельствует о том, что магнитная чувствительность преобразователя Холла в режиме КЗ увеличивается по сравнению с режимом ХХ и не зависит от толщины h пластины. При фиксированном сопротивлении нагрузки ПТН ($R_n = const$) параметр K_{np}^{K3} определяется подвижностью μ_e электронов, геометрией пластины (отношение l/b) и характером распределения тока I_0 по сечению bh (параметр k).

Сопоставление функциональных схем, реализующих режимы КЗ и ХХ (рисунок 1, б, в), показывает, что в режиме мультиплексирования информационным параметром ПХ является выходное сопротивление измерительной цепи R_{34} .

В рамках моделей (3), (5) функция преобразования ПХ $R_{34} = \varphi(B_n)_{I_0=const}$ определяется выражением

$$R_{34}(B_n)_{I_0=const} = -(\gamma_{xx}/\gamma_{xz})R_n = -K_z \rho_n(B_n)_{I_0=const}. \quad (6)$$

Знак минус в выражении (6) указывает на то, что магнитная индукция B_n и статические параметры R_{34} , ρ_n находятся в противофазе. Параметр $K_z = k \frac{b}{hl}$ учитывает геометрию активной области преобразователя Холла и его токовых электродов.

Поскольку справедливы тождества $\gamma_n = \frac{1}{\rho_n} = e\bar{n}\mu_e = \frac{\mu_e}{R_h}$, $R_h = \frac{1}{\bar{n}e} = \mu_e \rho_n$, при фиксированных параметрах активной области ($k = const$; $b = const$; $h = const$; $l = const$) в режиме МП определяются статические параметры преобразователя R_{34} , R_h , μ_e , ρ_n , γ_n :

$$\begin{cases} R_{34} = R_n(E_x/U_{ix})_{I_0=const}; \\ R_h = \gamma_{xx}h; \\ \mu_e = \gamma_{xz}(kb/IR_n); \\ \rho_n = R_h/\mu_e; \\ \gamma_n = \mu_e/R_h. \end{cases} \quad (7)$$

Система (7) описывает статическую модель параметрического преобразователя Холла, работающего в режиме мультиплексирования, когда в его измерительной цепи доминирует поперечный эффект Гаусса.

Рассмотрим динамические характеристики преобразователя Холла в различных режимах считывания информационного сигнала. При помещении разомкнутого преобразователя, с постоянным продольным током ($I_0 = const$), в переменное магнитное поле $B(t) = B_m \sin \omega_1 t$ информационный сигнал $E_x(t)$ определяется известными выражениями [2]

$$\begin{cases} E_x(t) = E_{x.m}(\omega_1) \exp\{j[(\omega_1 t) + \varphi_0(\omega_1)]\}; \\ E_{x.m}(\omega_1) = \gamma_{xx} I_0 B_m \sqrt{1 + (\omega_1 \mu_a \gamma_n b^2)^2 / 48}; \\ \varphi_0(\omega_1) = \arctg(\omega_1 \mu_a \gamma_n b^2 / 8), \end{cases} \quad (8)$$

где $B_m, \omega_1, E_{x.m}(\omega_1), \varphi_0(\omega_1)$ – соответственно амплитуда, круговая частота внешнего магнитного поля, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики ПХ в режиме ХХ; $\mu_a = \mu\mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость окружающей среды с относительной магнитной проницаемостью μ ; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная.

В рамках модели (5) динамическую модель (8) можно распространить на режим короткого замыкания

$$\begin{cases} U_{ix}(t) = -U_{ix.m}(\omega_1) \exp\{j[(\omega_1 t) + \varphi_0(\omega_1)]\}; \\ U_{ix.m}(\omega_1) = \gamma_{xz} I_0 B_m \sqrt{1 + (\omega_1 \tau_\mu)^2 / 48}; \\ \varphi_0(\omega_1) = \arctg(\omega_1 \tau_\mu / 8), \end{cases} \quad (9)$$

где $\tau_\mu = \mu_a \gamma_n b^2$ – время магнитной релаксации среды.

Из моделей (8), (9) вытекает тождество

$$\mu_a \gamma_n = (\omega_1 b^2)^{-1} \sqrt{48 \left\{ [E_{x.m}(\omega_1)/E_x(0)]^2 - 1 \right\}} = (\omega_1 b^2)^{-1} \sqrt{48 \left\{ [U_{ix.m}(\omega_1)/U_{ix}(0)]^2 - 1 \right\}}, \quad (10)$$

где $E_x(0) = \gamma_{xx} I_0 B_m$; $U_{ix}(0) = \gamma_{xz} I_0 B_m$.

Проведенный анализ показывает, что в режиме МП, в соответствии с моделью (7), инерционность ПХ определяется временем *электрической релаксации* $\tau_p = \varepsilon_0 \varepsilon \rho_n$, а в режимах ХХ и КЗ, согласно (8) – (10) – временем *магнитной релаксации* $\tau_\mu = \mu_a \gamma_n b^2$. Из тождества (10) определяется *оптимальное значение параметра* $b = b_0$, при котором параметры τ_p и τ_μ эквивалентны ($\tau_p = \tau_\mu$), а инерционность ПХ не зависит от режима работы измерительной цепи: $b_0 = \alpha_0 \rho_i \sqrt{\varepsilon/\mu}$, где $\alpha_0 = \sqrt{\varepsilon_0/\mu_0} \approx 0,00265 \text{ Ом}^{-1}$. Расчеты показывают, что в преобразователе на кремниевой основе ($\rho \approx 0,05...0,15 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\varepsilon = 12$), помещенном в воздушную среду ($\mu = 1$) $b_0 \approx (0,46...1,38) \text{ мм}$; для ферромагнитной среды ($\mu = 1000$) $b_0 \approx (14,51...43,54) \text{ мкм}$.

Экспериментальное исследование режимов преобразователя Холла проводится на базе промышленного датчика ДХК – 0,5 А, выполненного на поверхности *кремниевого кристалла* (номинальный ток управления $I_0 = 3,0 \text{ мА}$, коэффициент неравномерности управляющего тока $k \approx 1,0$, размеры активной части кристалла: $l = 3,0 \text{ мм}$; $b = 1,5 \text{ мм}$; $h = 0,2 \text{ мм}$) [4].

Внешнее магнитное поле создается *промышленным прибором ВМХ – 13* и *постоянным магнитом* прямоугольной геометрии (длина 24 мм; ширина 10 мм; высота 5 мм.). Первый формирует *постоянное и динамическое* магнитные поля, а второй – *постоянное поле с фиксированной нормальной составляющей индукции* ($B_n = \text{const}$). Информационные сигналы E_x, U_{ix} на выходе преобразователя Холла измеряются *цифровым мультиметром D831BUZ*.

Результаты эксперимента представлены в таблице 1 и на рисунках 2 – 4.

В режиме ХХ функция преобразования $E_x = \varphi(B_n)|_{I_0=\text{const}}$ остается *линейной* в широком диапазоне магнитной индукции $B \equiv B_n$ (рисунок 2, а), что согласуется с моделью (3). В режиме КЗ магнитная чувствительность $K_{np}^{KZ} = U_{ix}/B_n|_{I_0=\text{const}}$ *увеличивается* примерно на *три порядка* по сравнению с режимом ХХ (рисунок 2, б), что согласуется с моделью (5).

В фиксированном диапазоне магнитной индукции ($\Delta B_{n,i} = \text{const}$) угол α_i наклона линейной функции преобразования $U_{ix,i} = \varphi(\Delta B_{n,i})|_{R_n=\text{const}}$ к оси B_n остается практически постоянным ($\text{tg} \alpha_i \approx \text{const}$). При фиксированном значении индукции ($B_n = \text{const}$) *дальность* x_0 действия ПХ *линейно* зависит от сопротивления R_n нагрузки ПТН (рисунок 2, в), что соответствует модели (5). В режиме МП функция преобразования $R_{34} = \varphi(\Delta B_n)|_{R_n=\text{const}}$ является *кусочно-линейной* в фиксированном диапазоне индукции $\Delta B_n = \text{const}$ (рисунок 2, г).

В рамках моделей (6), (7), по результатам измерения параметров E_x, U_{ix} рассчитываются *статические параметры* $R_h, \mu_e, \rho_n, R_{34}$ (таблица 1), а также определяется их зависимость от магнитной индукции B_n (рисунок 3).

В диапазоне изменения индукции $B_n = 1...200 \text{ мкТл}$ параметры R_h, μ_e имеют *флуктуирующий характер*; в диапазоне индукции $B_n > 200 \text{ мкТл}$ постоянная Холла R_h практически *не зависит* от интенсивности магнитного поля, а подвижность электронов μ_e – *монотонно убывает* с ростом параметра B_n (рисунок 3, а, б); функция преобразования $\rho_n = \varphi(B_n)$ является *монотонно возрастающей*, что согласуется с эффектом Гаусса (рисунок 3, в).

Динамический режим преобразователя Холла, исследуется в режиме КЗ на различных циклических частотах f_1 внешнего магнитного поля *при фиксированных значениях* амплитуды индукции B_m .

В режиме мультиплексирования, в соответствии с моделями (7) – (9), инерционность ПХ определяется временем $\tau_p = \varepsilon_0 \varepsilon \rho_n$ *электрической релаксации пластины*, о чем свидетельствует амплитудно-частотная характеристика $U_{ix,m} \varphi(f_1)|_{B_m=\text{const}}$ (рисунок 4, а). При фиксированном сопротивлении нагрузки ПТН ($R_n = \text{const}$) инерционность ПХ ограничена временем $\tau_\mu = \mu_a \gamma_n b^2$ *магнитной релаксации среды* (рисунок 4, б, в), что соответствует моделям (9), (10).

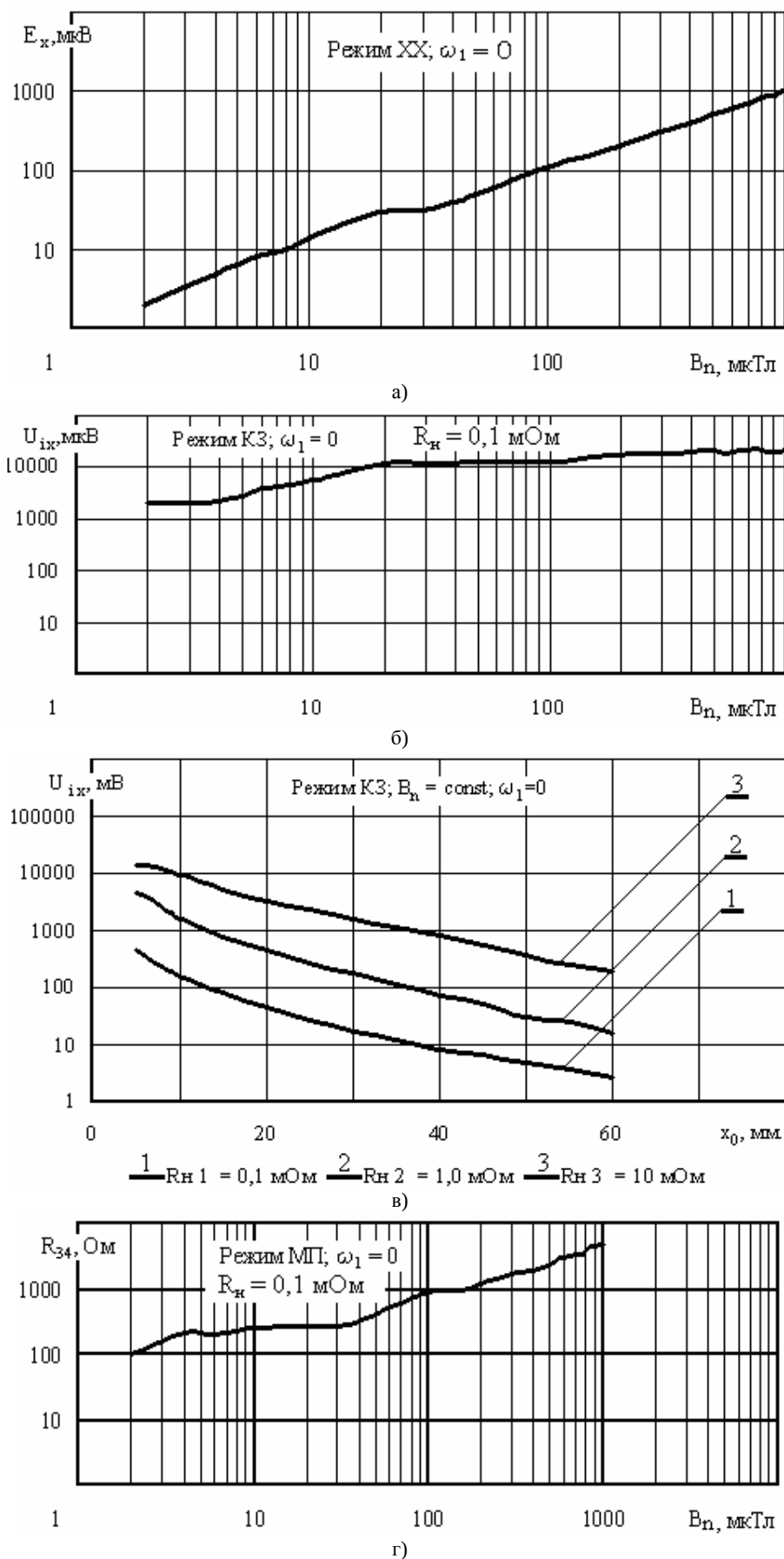


Рисунок 2 – Результаты исследования статического режима преобразователя Холла

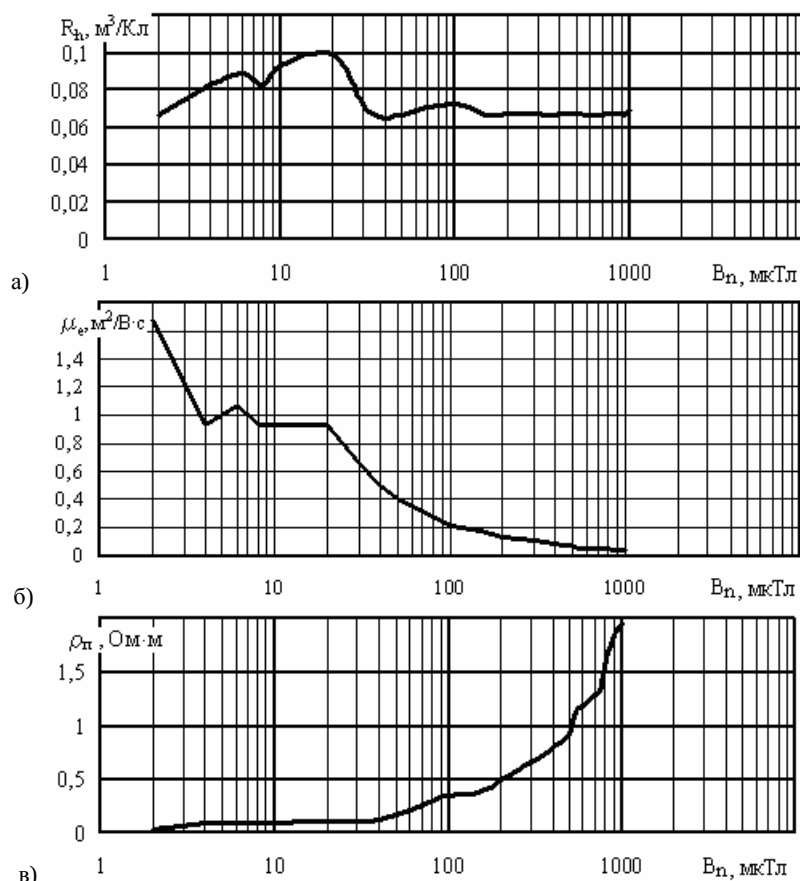
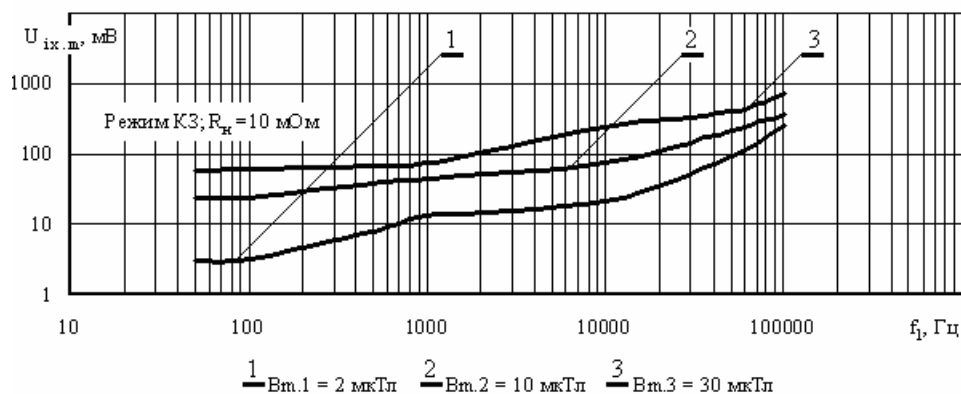


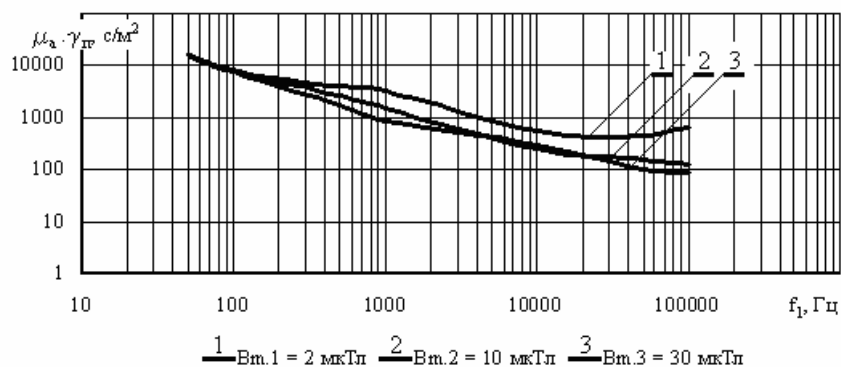
Рисунок 3 – Результаты расчета статических параметров преобразователя Холла

Таблица 1 – Результаты измерения статических параметров преобразователя Холла

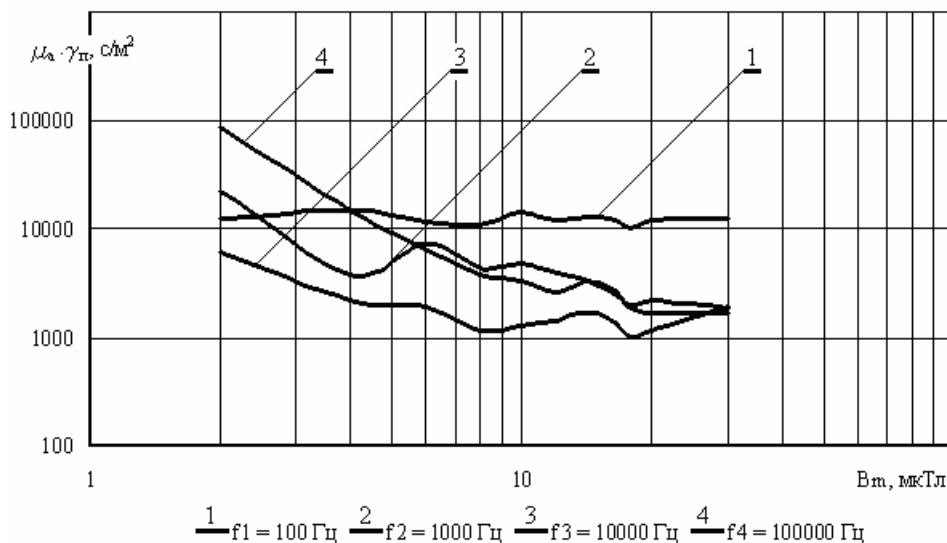
Режим КЗ – $R_H = 0,1 \text{ МОм}$. Режим ХХ – $R_{oc} \equiv R_H = 0$								
$B_n, \text{мкВт}$	$E_x, \text{мкВ}$	$\gamma_{xx}, \text{В}/(\text{А} \cdot \text{Тл})$	$R_h, \text{м}^3/\text{Кл}$	$U_{ix}, \text{мкВ}$	μ	$\mu_e, \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$\rho_n, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$R_{34}, \text{Ом}$
2	2	333	0,067	2010	335000	1,675	0,040	100
4	5	417	0,083	2250	187500	0,938	0,089	222
6	8	444	0,089	3840	213333	1,067	0,083	208
8	10	417	0,083	4470	186250	0,931	0,089	224
10	14	467	0,093	5630	187667	0,938	0,099	249
20	30	500	0,100	11260	187667	0,938	0,107	266
30	32	356	0,071	11870	131889	0,659	0,108	270
40	39	325	0,065	11930	99417	0,497	0,131	327
50	50	333	0,067	12260	81733	0,409	0,163	408
100	110	367	0,073	12580	41933	0,210	0,350	874
150	151	336	0,067	16150	35889	0,179	0,374	935
200	203	338	0,068	16730	27883	0,139	0,485	1213
250	256	341	0,068	17700	23600	0,118	0,579	1446
300	307	341	0,068	18420	20467	0,102	0,667	1667
350	350	333	0,067	19380	18457	0,092	0,722	1806
400	406	338	0,068	20600	17167	0,086	0,788	1971
450	457	339	0,068	21740	16104	0,081	0,841	2102
500	509	339	0,068	22030	14687	0,073	0,924	2310
550	553	335	0,067	19450	11788	0,059	1,137	2843
600	603	335	0,067	20340	11300	0,057	1,186	2965
650	654	335	0,067	21240	10892	0,054	1,232	3079
700	708	337	0,067	22060	10505	0,053	1,284	3209
750	763	339	0,068	23090	10262	0,051	1,322	3304
800	811	338	0,068	21280	8867	0,044	1,524	3811
850	863	338	0,068	20060	7867	0,039	1,721	4302
900	913	338	0,068	19800	7333	0,037	1,844	4611
950	954	335	0,067	20030	7028	0,035	1,905	4763
1000	1030	343	0,069	21010	7003	0,035	1,961	4902



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Результаты исследования динамического режима преобразователя Холла

Расчеты показывают следующее:

1) для фиксированных параметров ПХ ($\epsilon = 12$; $\rho_n \approx 0,15 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $b = 0,0015 \text{ м}$) граничная частота полосы пропускания, соответствующая режиму мультиплексирования $f_{zp}^{mn} \approx 10^{10} \text{ Гц}$;

2) в режиме короткого замыкания граничная частота f_{zp}^{K3} зависит от магнитной проницаемости μ среды, окружающей преобразователь ($f_{zp}^{K3} \equiv f_{zp}^{K3}|_{\mu=\text{const}}$);

3) в воздушной среде $f_{zp}^{K3}|_{\mu=1} \approx 8,44 \cdot 10^9 \text{ Гц}$; в ферромагнитной среде $f_{zp}^{K3}|_{\mu=1000} \approx 8,44 \cdot 10^6 \text{ Гц}$.

Таким образом, эксперимент подтвердил, что инерционность преобразователя Холла зависит от режима работы его измерительной цепи и доминирующего гальваномагнитного эффекта. Совместное использование режимов ХХ, КЗ, МП обеспечивает *целенаправленное управление* статическими и динамическими характеристиками ПХ, что расширяет его функциональные возможности.

Перспективным направлением дальнейших исследований планируется повышение разрешающей способности и помехозащищенности гальваномагнитных преобразователей.

Библиографический список

1. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи / Е.С. Полищук. — К.: Вища шк., 1981. — 296 с.
2. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи) / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 320 с.
3. Кофлин Р. Операционные усилители и линейные интегральные схемы / Р. Кофлин, Ф. Дрискол. — М.: Мир, 1979. — 360 с.
4. Хомерики О.К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля / О.К. Хомерики. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 136 с.

Поступила в редакцию 8.07.2008 г.