



Методы расчета и выбора параметров магнитоиндукционных преобразователей для измерения тока пучков заряженных частиц

С. В. ГОРГОЦ, А. Ю. ПОЛЯКОВ, В. М. РЫБИН

Приведены номограммы с семействами кривых, позволяющие найти близкие к оптимальным параметры указанных магнитоиндукционных преобразователей (МИП) при заданных требованиях и условиях их работы. Номограммы построены на основе теоретических расчетов и экспериментальных зависимостей, полученных при практическом исследовании МИП. Рассмотрена программа расчета параметров МИП на ПЭВМ.

Схема МИП приведена на рис. 1. Пучок заряженных частиц I_e проходит сквозь тороидальный сердечник из ферромагнитного материала с магнитной проницаемостью μ . На сердечнике с сечением S и средним радиусом r располагается обмотка из w витков. Нагрузкой обмотки является сопротивление Z_H , которое можно представить параллельным соединением активного сопротивления R_H и емкости C_H , содержащей паразитную емкость C_n (междувитковую емкость и собственную емкость обмотки на землю или защитный корпус преобразователя) и собственную емкость нагрузки C_0 (с учетом входной емкости измерительной схемы). Сопротивление R_0 включает в себя активное сопротивление обмотки и сопротивление, эквивалентное потерям в сердечнике.

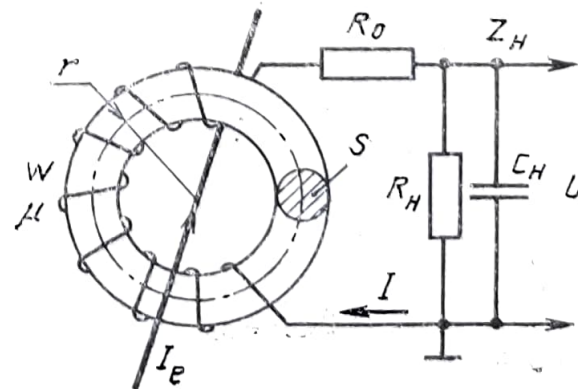


Рис. 1

$S_{мин}, МБ/А$

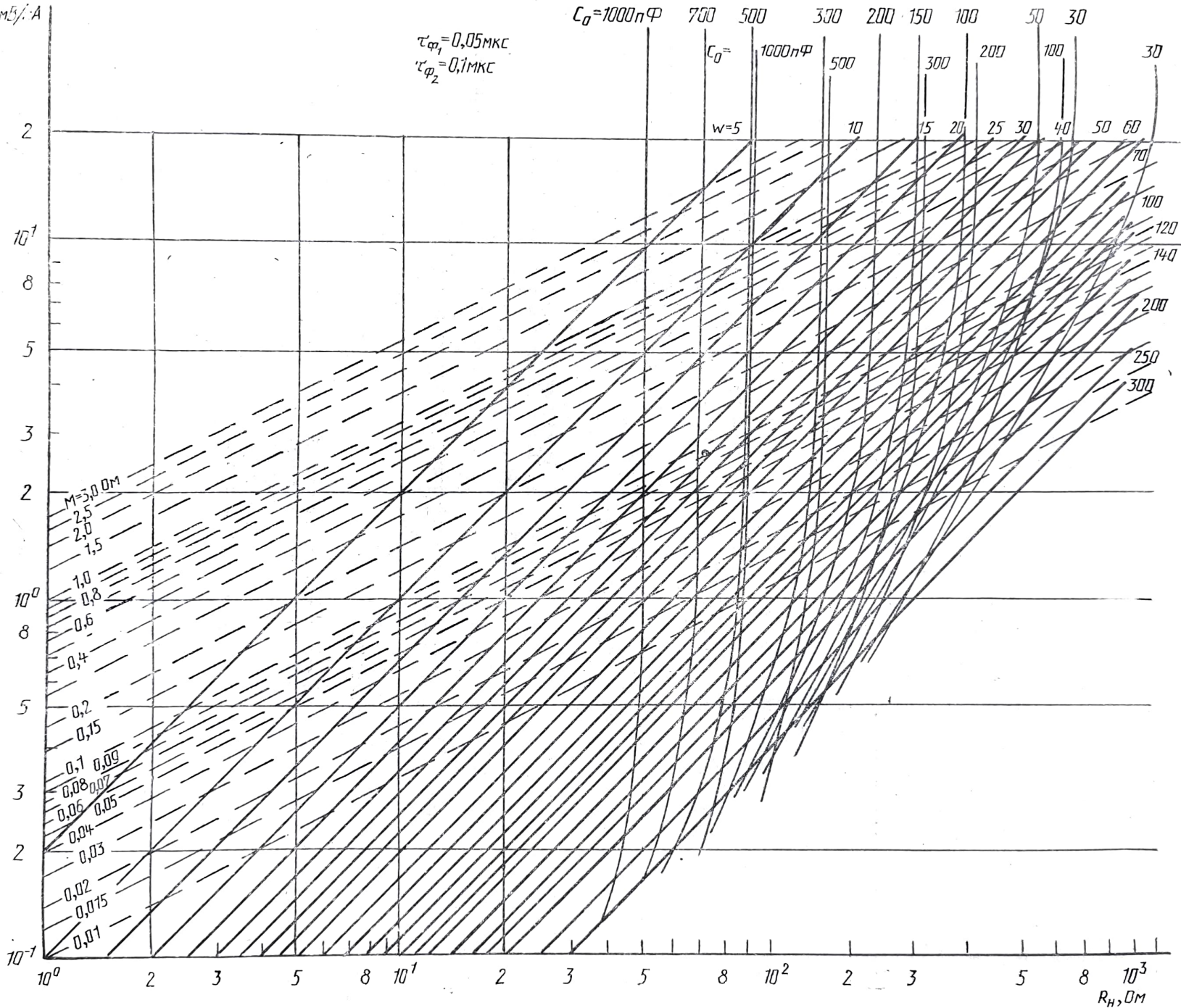


Рис. 2

На основе решения системы уравнений [1], которые описывают процессы, протекающие в МИП, можно сделать выводы о том, что для практических целей наиболее интересны режимы его работы как трансформатора тока (апериодический режим) и контура ударного возбуждения.

Режим трансформатора тока МИП наблюдается при малом сопротивлении нагрузки $R_n \ll \rho/2$, где $\rho = \sqrt{L/C_n}$ — волновое сопротивление контура преобразователя, L — индуктивность его обмотки, и соответствующем выборе остальных параметров МИП, зависящем от параметров импульсов тока пучка. Полоса частот импульсов, пропускаемых МИП без существенных искажений, достаточно широка и форма импульсов выходного напряжения преобразователя соответствует форме импульсов тока пучка. В этом режиме МИП имеет коэффициент трансформации $1/\omega$, его чувствительность близка к R_n/ω .

Режим контура ударного возбуждения МИП возникает при большом сопротивлении нагрузки $R_n \gg \rho/2$. Преобразователь представляет собой резонансный контур, возбуждаемый импульсами тока пучка заряженных частиц. Если при этом параллельно нагрузке подключить диод, то на выходе датчика получатся импульсы напряжения, по форме отличающиеся от импульсов тока пучка, но значительно большие по амплитуде, чем при работе в апериодическом режиме. Чувствительность МИП в этом режиме растет с увеличением добротности и волнового сопротивления резонансного контура и близка к ρ/ω .

При других сопротивлениях нагрузки полоса пропускания МИП уменьшается по сравнению с режимом трансформатора тока, импульсы выходного напряжения по форме не соответствуют импульсам тока пучка, а амплитуда их значительно меньше, чем при работе в режиме контура ударного возбуждения из-за уменьшения добротности контура. Поэтому прак-

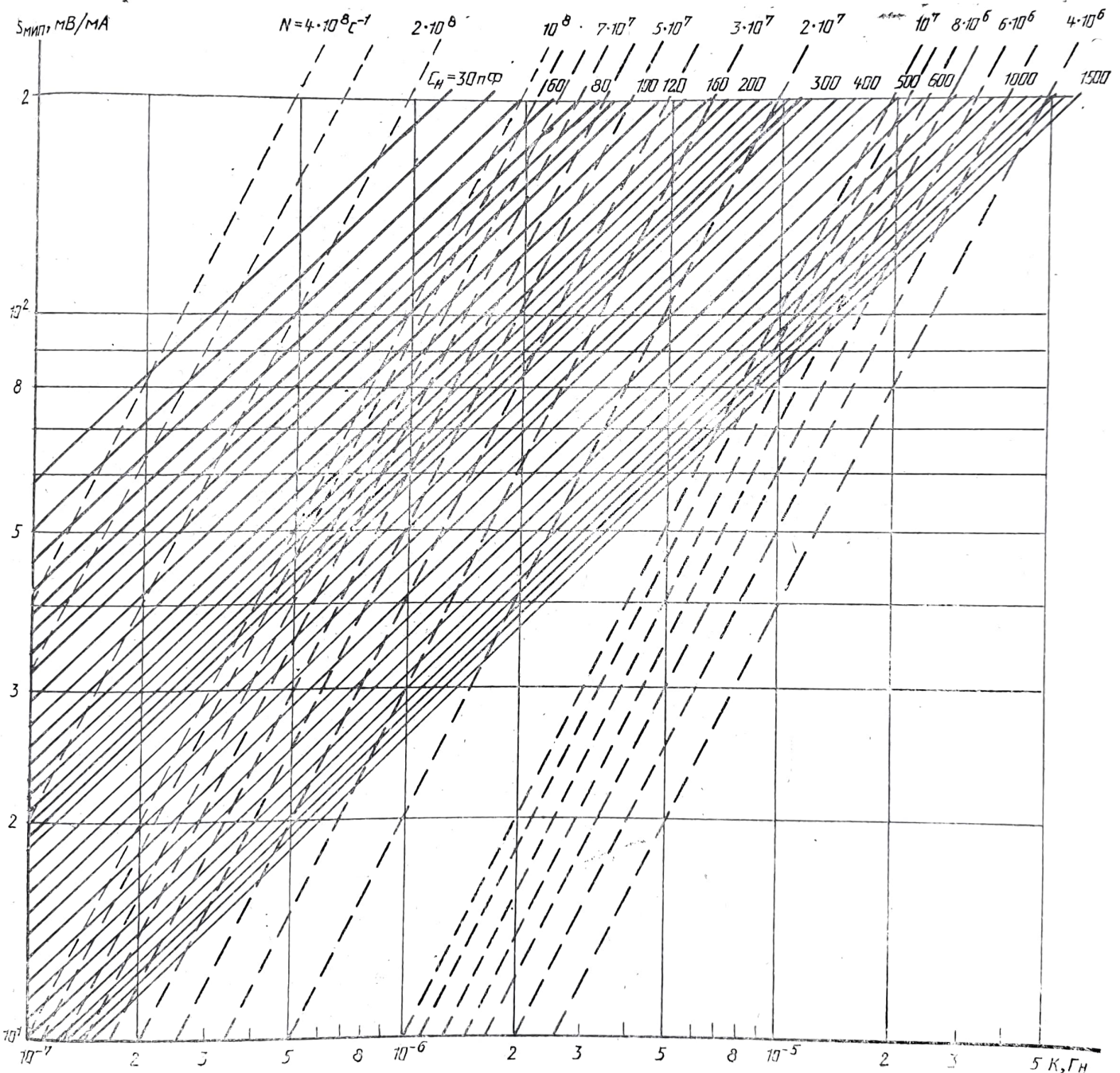


Рис. 3

тическое использование преобразователей в таких режимах нецелесообразно.

Большое количество независимых параметров МИП тока (число витков обмотки ω , сопротивление R_n и емкость C_n нагрузки, геометрические размеры и начальная магнитная проницаемость сердечника) и наличие взаимосвязанных параметров (индуктивность обмотки L и паразитная емкость C_n , постоянная времени обмотки датчика и постоянная времени заряда емкости нагрузки), по-разному влияющих на работу МИП, сильно затрудняют определение его оптимальных параметров, т. е. параметров, позволяющих при заданных требованиях и условиях работы получить наибольшую чувствительность преобразователя. Принципиально возможный аналитический способ нахождения оптимальных параметров весьма сложен и трудоемок с инженерной точки зрения из-за неопределенности выбора независимых параметров преобразователя, вследствие чего произвольный их выбор не всегда может привести к оптимальному варианту. Поэтому был разработан графический метод (**метод номограмм**), который позволяет получить оптимальные параметры преобразователя по номограммам с семейными кривыми и избежать многократных проверочных расчетов. Кроме того, разработана программа расчета параметров МИП, реализованная на ПЭВМ типа IBM PC.

При построении номограмм введены ограничения на изменения следующих величин, влияющих на работу МИП:

длительность импульсов тока пучка $t_n = 1-10$ мкс;
длительность фронта импульсов тока τ_f составляет не более 20—25 % от t_n ;

форма импульсов тока пучка близка к трапециoidalной; отношение $S/2\pi r$ используемых сердечников из феррита больше 0,3 мм, но не превышает 4 мм;

погрешность измерения тока пучка 1—1,5 %.

Основная номограмма, которая позволяет выбрать оптимальные параметры преобразователя, работающего в режиме трансформатора тока (рис. 2), представляет собой построенные в логарифмическом масштабе графики зависимости чувствительности преобразователя $S_{\text{МИП}} = U/I_e$ от сопротивления нагрузки R_n при различных числах витков обмотки ω . На номограмме отмечены области, где неравномерность вершины и длительность фронта импульсов выходного напряжения преобразователя не превышают определенных значений. Неравномерность вершины (показано пунктирными линиями) зависит от параметра M , который определяется по формуле

$$M = K\lambda/t_n,$$

где K — коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрических размеров и материала сердечника,

$$K_{\square} = \frac{\mu_0 \mu S}{2\pi r}, \quad K_{\square} = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} b \ln \frac{R_2}{R_1};$$

μ_0 — магнитная постоянная; S — площадь сечения тороидального сердечника; r — средний радиус сердечника с круглым сечением; R_1, R_2 — внутренний и внешний радиусы сердечника с прямоугольным сечением; $\lambda = -\ln(1-\Delta/100)$; Δ — допустимая относительная неравномерность вершины импульса выходного напряжения, в процентах.

Параметр M можно рассчитать по формуле или найти по графикам зависимости M от длительности импульсов тока пучка t_n при различных значениях произведения λK .

На длительность фронта оказывают влияние сопротивление нагрузки R_n , собственная емкость нагрузки C_0 и паразитная емкость обмотки на землю или корпус датчика C_n , зависящая от числа витков обмотки ω . Если представить зависимость $C_n = f(\omega)$, снятую экспериментально, выражением $C_n = C_{n \text{ min}} + 10^{-14} \omega^2/3$, которое достаточно точно при $\omega < 300$ совпадает с экспериментом, то можно получить уравнение кривой с длительностью фронта

$$\tau_f = (C_0 + C_{n \text{ min}} + 10^{-14} \omega^2/3) R_n,$$

где $C_{n \text{ min}} \approx 20$ пФ.

Номограмма, позволяющая выбрать оптимальные параметры преобразователя, работающего в режиме контура ударного возбуждения, представлена на рис. 3 и показывает зависимость чувствительности преобразователя $S_{\text{МИП}}$ от параметра $K = \mu_0 \mu S / (2\pi r)$, который характеризует геометрические размеры и материал сердечника, при различной емкости нагрузки C_n . Необходимо отметить, что построенные зависимости справедливы для сердечников, изготовленных из материала с малыми потерями (феррита или какого-либо другого магнитодиэлектрика). Пунктирные линии на номограмме дают возможность определить границы области, в которой при некотором числе витков обмотки и заданных значениях длительности фронта τ_f и длительности импульсов тока t_n резонансная частота датчика $\omega_0 = (LC_n)^{-1/2}$ ($L = \omega^2 K$) может быть выбрана в пределах, определяемых неравенством $4\tau_f \leq \pi / (2\omega_0) \leq t_n$. Максимальная частота ω_{max} находится из условия независимости чувствительности преобразователя от изменений τ_f , т. е. $\omega_{\text{max}} \tau_f / 2 \ll 1$, а минимальная частота ω_{min} определяется из необходимого условия $\pi / (2\omega_{\text{min}}) \leq t_n$. Эти границы зависят от параметра N , предельные значения которого $N_{\text{min}} = \pi \omega / (2t_n)$ для ω_{min} и $N_{\text{max}} = \pi \omega / (8\tau_f)$ для ω_0 находят по графику, показывающему его зависимость от числа витков обмотки ω при разных τ_f и t_n импульсов тока пучка. Собственная емкость нагрузки C_0 определяется по графикам зависимости емкости нагрузки C_n от числа витков обмотки ω при разных C_0 .

Программа расчета параметров МИП на ПЭВМ написана с целью использования ее в процессе проектирования магнитноиндукционных преобразователей. Программа реализована на языке Паскаль на ПЭВМ типа IBM PC/AT. Блок расчета параметров МИП включает в себя следующие процедуры: Arer — для вычисления параметров МИП, работающего в режиме трансформатора тока; Col — для вычисления параметров МИП, работающего в режиме контура ударного возбуждения. Эти процедуры представляют собой набор уравнений для параметров МИП при различных составляющих вектора исходных данных.

Для вычислений корней уравнений в процедурах Arer и Col используется процедура Newton-Maehly. Приближение для каждого корня выполняется путем итераций. В процедуре Newton-Maehly используется схема, которая реализуется в процедуре Hagner.

Программа позволяет при заданных требованиях, параметрах МИП и условиях его работы определить его основные характеристики (чувствительность, неравномерность вершины и длительность фронта).

Выводы. Практика использования предлагаемых методов для выбора и расчета оптимальных параметров МИП показала, что при некотором навыке они позволяют довольно быстро и достаточно просто при заданных требованиях определить максимальную чувствительность для имеющихся сердечников или найти геометрические размеры сердечника и магнитную проницаемость материала для получения необходимой чувствительности преобразователя при известных условиях его работы и их можно рекомендовать для использования при проектировании МИП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Армениян Е. В., Рыбин В. М. Измерение параметров пучков заряженных частиц. — М.: МИФИ, 1985.
2. Москалев В. А., Сергеев Г. И. Измерение параметров пучков заряженных частиц. — М.: Энергоиздат, 1991.
3. Бехтев Б. В., Бородулин А. И., Рыбин В. М. // Вопросы атомной науки и техники. Линейные ускорители. — Вып. 1 (2).
4. Фаронов В. В. Программирование на персональных ЭВМ в среде Турбопаскаль. — М.: МГТУ, 1991.