

В.Т. КОНДРАТОВ

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ
ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ И
ИНФОРМАЦИИ СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО.****ЧАСТЬ 7. ИЗМЕРЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ ЛАНДАУ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ
УСЛОВИЯХ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ**

В работе рассмотрен метод измерения дискретных энергетических уровней Ландау исследуемых образцов материалов, описано несколько схемотехнических решений магнитопольных измерителей разной степени сложности — от простого до много-функционального. Приведены результаты экспериментальных исследований дискретных уровней Ландау. Работа представляет интерес для метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих магнитопольные методы и средства измерения физических величин.

Ключевые слова: метод измерения, магнитопольные измерители, уровень Ландау.

V.T. KONDRATOV

V.M. Glushkov Institute of cybernetics of National academy of Science of Ukraine

**FUNDAMENTAL METROLOGY: THE MAGNETIC-FIELD THEORY OF MEASUREMENTS WITH USE THE
PHENOMENON OF TRANSFER OF ENERGY AND INFORMATION THROUGH MATERIAL OR SUBSTANCE
PART 7. MEASUREMENT OF DISCRETE POWER LANDAU LEVELS UNDER NORMAL CONDITIONS
CARRYING OUT OF MEASUREMENTS**

The paper discusses the method of measuring the discrete Landau energy levels of the samples of materials under study and several circuit solutions for magnetic-field meters of varying degrees of complexity, from simple to multifunctional. It was established experimentally that for the implementation of the method, physical conditions must be created a priori, in which, first of all, the laws of conservation of mechanical and electromagnetic energy in the material and the law of Faraday electromagnetic induction that provide fundamental interactions of the high-frequency solenoidal pulse magnetic field with the electrons of the material under investigation. It has also been established that for the transfer of the energy of the Landau discrete energy level to an adequate energy of a radio pulse, it is necessary to create conditions for the release of the energy of electrons during their abrupt transition from one energy level to another. The implementation of these conditions is ensured by manufacturing a closed-type monolithic flat two-circuit waveguide from the material under study, a transmitting antenna installed between the waveguide circuits, and cylindrical inductors that form a solenoidal vector field. It has been established that discrete Landau energy levels exist not only in metals, but also in dielectrics. This indicates that in dielectrics (in conditionally conducting and in weakly conducting material media) diamagnetism of transport electrons can be observed. Analytical expressions are obtained for the magnetic flux, the intensity of a high-frequency solenoidal pulsed magnetic field; The measurement equation for the n-th Landau energy level is obtained. A method has been developed and described that ensures the measurement of the discrete Landau energy levels of any macrocosm materials, moreover, under normal conditions of measurement. Experimentally obtained results confirmed the equidistance of Landau discrete energy levels. Almost 4-5 and even 6 emissions of radio pulses are observed. The envelopes of the Landau levels are cubic or quadratic in nature and are downward in a given system of scales. The paper lists the conditions for the practical implementation of the magnetic field method for measuring the discrete Landau energy levels of the macroscopic materials. It is stated that the magnetic field level gauges of Landau on microcontrollers are of the greatest interest. They provide the highest degree of automation of the measurement process and high measurement accuracy. The obtained results expand our understanding of the magnetic field methods and means of measuring the Landau level under normal conditions for carrying out these measurements. The paper is of interest for metrologists, experts, masters and the post-graduate students studying magnetic-fields methods and measuring instruments of level and energy of Fermi in a macrocosm.

Keywords: a measurement method, magnetic-field measuring instruments, level Landau.

Введение. Данная статья является дальнейшим развитием магнитопольной теории измерений (МПТИ), XXI век характеризуется критическим отношением ученых к достижениям в области физики и математики XX века. Учеными переосмысливаются теоретические и практические результаты, полученные маститыми учеными. На сегодняшний день установлено множество парадоксов в физике, электродинамике и в других науках. Не обошли стороной и теорию Ландау.

В [1] показано, что в работе Ландау много теоретических ошибок. Несмотря на это, общепринятая теория электронного газа металла в магнитном поле была признана и послужила основой для построения обширной и успешной области науки. Общепринятое мнение было основано на известном решении задачи о движении заряженной частицы (электронов) в однородном магнитном поле. На самом деле необходимо было решать задачу движения заряженных частиц под действием соленоидального импульсного магнитного поля (типа меандр), обеспечивающего прямолинейное движение электронов в «паузах» между импульсами.

В [1] отмечается ошибочность утверждение о том, что в плоскости, перпендикулярной полю, частица движется по фиксированной круговой орбите. Полагаем, что речь должна идти о векторе индукции соленоидального импульсного магнитного поля. В плоскости, перпендикулярной вектору индукции соленоидального импульсного магнитного поля, движущиеся электроны создают продольную высокочастотную электромагнитную волну, которая распространяется, согласно теореме Умова – Поинтинга, по замкнутому контуру не круговой, а произвольной, в общем случае, формы. Именно контур определяет траекторию движения электромагнитной волны как в пределах, так и вне действия импульсного

магнитного поля на физическую (материальную) систему замкнутого типа. Это подтверждается и наши экспериментальными исследованиями и измерениями уровней Ландау.

В квантовой статистической теории Ландау и в классической теории Бора принято, что газ однородно заполняет весь отведённый объём. В плоскости, перпендикулярной соленоидальному импульсному магнитному полю высокой частоты, электронный газ в состоянии равновесия имеет неоднородную плотность, убывающую с расстоянием от оси. Это подтверждается, например, магнитополем эффектом удержания горячей плазмы от контакта с контуром СВЧ-печи, нагревательный элемент которой выполнен в виде катушки индуктивности параболического типа [2].

Согласно [1], аналитическое выражение для удельной диамагнитной восприимчивости электронного газа не является правильным. Оно не зависит от постоянной Планка, т.е. не описывает квантовый эффект, который не должен проявляться при $\hbar \rightarrow 0$. Из упомянутого аналитического выражения Ландау следует, что свободный электронный газ должен быть парамагнитным. Это не соответствует эксперименту. Количественно сравнивать аналитическое выражение для удельной диамагнитной восприимчивости электронного газа с существующими результатами измерений магнитной восприимчивости невозможно, так как эти результаты сильно отличаются у разных авторов [1].

Выше сказанное свидетельствует о важности решения задачи измерения дискретных энергетических уровней Ландау с целью уточнения существующих теорий и разрешения парадоксов путем использования новых экспериментальных данных.

Объектом исследований являются магнитополевые методы и средства измерений.

Предметом исследований является описание сущности магнитополевого метода измерения (МП МИ) уровня Ландау и соответствующих схмотехнических решений магнитополевых измерителей.

Результаты исследований

1. Квантование, дискретные энергетические уровни Ландау и их измерение

В квантовой механике «квантование Ландау» — это квантование циклотронных орбит заряженных частиц (электронов и др.) в магнитных полях [3]. Квантование Ландау характеризует колебания электронных свойств материалов в зависимости от значения индукции приложенного магнитного поля.

Известно [4, 5], что заряженные частицы в постоянном магнитном поле вращаются по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору индукции магнитного поля, или двигаются по винтовой линии, причём ось спирали параллельна оси магнитного поля. Частицы могут иметь какую угодно энергию; значения радиуса и шага спирали могут быть какими угодно.

В магнитном поле заряженные частицы, движущиеся в плоскости, перпендикулярной этому полю, могут занимать орбиты только с дискретными значениями энергии. Эти орбитальные энергетические уровни называются уровнями Ландау. Они впервые получены Л. Д. Ландау в 1930 году как решение уравнения Шрёдингера для заряженной частицы в присутствии магнитного поля. Его решением являются волновые функции электрона в гармоническом потенциале.

Несмотря на то, что движение частицы происходит в трёхмерном пространстве, ее энергетический спектр зависит только от двух квантовых чисел: непрерывного k_z и дискретного n . Это означает, что спектр частицы является вырожденным [4]. В этой связи уровни Ландау также являются вырожденными. Количество электронов на уровне прямо пропорционально силе F приложенного магнитного поля ($F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$, где α — угол между направлениями \mathbf{v} и \mathbf{B} ; q — заряд электрона; v — скорость движения электрона; B — индукция магнитного поля).

Существованием уровней Ландау объясняется диамагнетизм электронов проводимости в металлах и полупроводниках [6]. Этот эффект иначе известен как диамагнетизм Ландау. Наши исследования показали, что уровни Ландау существуют и в диэлектриках. Следовательно, в диэлектриках (в условно проводящих и в слабо проводящих материальных средах) наблюдается диамагнетизм электронов переноса (для металлов — это электроны проводимости).

Согласно классической механике, движение частицы с массой m и зарядом e в плоскости, перпендикулярной магнитному полю H , представляет собой периодическое движение по окружности под действием силы Лоренца с круговой (циклотронной) частотой $\omega_c = |e| H / mc$ [5].

В квантовой механике такому финитному движению по окружности соответствуют движения с квантованными значениями энергии E_n , причём $E_n = (n+1/k_2)\hbar\omega_c$, где n — квантовое число или номер уровня Ландау; $k_2 = 2$. Это явление называется орбитальным квантованием.

Уровень Ландау связан с магнитной индукцией величиной [7]

$$S_l = |e| \hbar / mc = 1,16 \cdot 10^{-8} \text{ эВ/Гс} = 1,16 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/Тл}, \quad (1)$$

представляющей собой крутизну преобразования напряженности магнитного поля в энергетический уровень. В этом случае энергия n -го уровня Ландау описывается уравнением величин

$$E_n = S_l (n+1/k_2) H \text{ эВ}. \quad (2)$$

Согласно (2), расстояние между уровнями Ландау, при заданных дискретных значениях n , зависит от напряженности H магнитного поля ($\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0$).

Полный макроскопический ток через некоторый контур L , выраженный через плотность тока \mathbf{j} через любую поверхность S , натянутую на контур L , определяется равенством

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = \oint_S \mathbf{j} d\mathbf{S}, \quad (3)$$

где $d\mathbf{S} = \mathbf{n}dS$, а вектор \mathbf{n} — единичный нормальный вектор к элементарной поверхности площадью dS .

Определим магнитную индукцию в соленоиде с линейной плотностью витков n_B и силой тока I_x , при условии, что витки намотаны на сердечник с магнитной проницаемостью μ . В этом случае циркуляция вектора напряженности магнитного поля \mathbf{H} по контуру L равна

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = Hl_c. \quad (4)$$

Поскольку контур длиной $n_B l_c$ охватывает тот же суммарный ток I_x , то можно записать, что $\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = Hl_c = n_B l_c I_x$. При переменном токе (типа меандр) высокой частоты ω_0 и амплитудой I_m , т.е. при

$$i_c(t) = I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1)\omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right],$$

где $k_1 = 1$, а $k_2 = 2$, n — любое целое число от 1 до N (число гармоник), получим уравнение величин для напряженности импульсного магнитного поля высокой частоты в виде

$$H_N(t) = n_B I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1)\omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] \quad (5)$$

ампер-витков на метр за секунду.

Выражение (5) дает завышенные результаты, поскольку предполагает наличие бесконечно длинного соленоида, для которого $l_c \gg R$. Для полубесконечного соленоида напряженность импульсного магнитного поля высокой частоты

$$H_x = \frac{n_B}{k_2} I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1)\omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right]. \quad (6)$$

Подставив уравнение величин (6) в (2), получим уравнение измерений n -го энергетического уровня Ландау в виде

$$E_n(t) = S_l(n+1/k_2) \frac{n_B}{k_2} i(t) \text{ эВ} = S_l(n+1/k_2) \frac{n_B}{k_2} I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1)\omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] \text{ эВ}. \quad (7)$$

или

$$E_n(t) = 5,8 \cdot 10^{-5} (n+1/k_2) n_B l_c I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1)\omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] \text{ эВ}. \quad (8)$$

Известно [8], что внутри соленоида (рис. 1) напряженность магнитного поля значительно больше (примерно в l_c^2 / R^2 раз) напряженности вне него. Магнитное поле внутри соленоида является однородным всюду, кроме пространства вблизи концов, где оно ослабевает, а линии напряженности начинают расходиться. Вне соленоида напряженность поля при $l_c \gg R$ почти равна нулю. Указанная особенность соленоидов используется для получения однородных магнитных полей.

Определим напряженность магнитного поля внутри соленоида, выполненного из тонкого провода, намотанного плотно виток к витку на цилиндрический каркас при разных соотношениях длины l_c и радиуса R катушки индуктивности (рис. 1).

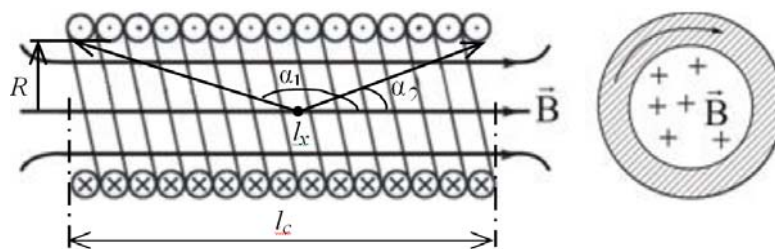


Рис. 1. Чертеж сечения соленоидального контура

Уравнение измерений напряженности магнитного поля соленоида можно получить на основании закона Био – Савара – Лапласа, как суперпозицию магнитных полей системы элементарных круговых токов.

С учетом графических построений, приведенных на рис. 1, напряженность магнитного поля в произвольной точке l_x конечного соленоида с линейной плотностью витков n_B и длиной l_c определяется согласно уравнению величин [8, 9], но для тока типа меандр:

$$H_x(t) = \frac{n_B}{k_2} I_m \left[\frac{l_x}{\sqrt{R^2 + l_x^2}} + \frac{l_c - l_x}{\sqrt{R^2 + (l_c - l_x)^2}} \right] \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] = \frac{n_B}{k_2} I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (9)$$

С учетом (9), можно записать, что

$$E_n(t) = S_l(n+1/k_2) \frac{n_B}{k_2} I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \text{ эВ}. \quad (10)$$

Из выражения (9) следуют два частных случая:

1. Напряженность магнитного поля внутри соленоида в начале и в конце его оси, т.е. при $\{l_x\} = 0$ и $l_x = l_c$ равна:

$$H_x = n_B I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] \frac{l_x}{k_2 \sqrt{R^2 + l_x^2}} = \frac{n_B}{k_2} I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] (\cos \alpha_1 < \frac{n_B}{k_2} i_c(t)). \quad (11)$$

Тогда

$$E_n(t) = S_l(n+1/k_2) \frac{n_B}{k_2} I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] \cos \alpha_1 \text{ эВ}. \quad (12)$$

2. Напряженность поля внутри соленоида, в середине оси, т.е. при $l_x = l_c / k_2$, равна:

$$H_x(t) = n_B I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] \left[\frac{l_x}{k_2 \sqrt{R^2 + (l_c / k_2)^2}} \right] < n_B i_c(t). \quad (13)$$

В этом случае уравнение измерений энергетического уровня Ландау имеет вид:

$$E_{L_n}(t) = S_l(n+1/k_2) n_B I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] \frac{l_x}{k_2 \sqrt{R^2 + (l_c / k_2)^2}} \text{ эВ}. \quad (14)$$

К сожалению, получаемые результаты определения напряженности магнитного поля соленоида оказываются несколько завышенными. Необходимо, чтобы значение энергетического уровня Ландау исследуемого образца материала было приведенным, согласно СИ, к единице пути (к 1 м) и к единице площади (к 1 м²). В этом случае энергетический уровень Ландау определяется, при нормальных условиях выполнения измерений, согласно уравнению величин

$$E'_{L_n}(t) = S'_l(n+1/k_2) n_B I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] \frac{l_x}{k_2 \sqrt{R^2 + (l_c / k_2)^2}} \text{ эВ}, \quad (15)$$

где $S'_l = \frac{S_0}{S_x} \frac{l_0}{l_x} S_l$ — крутизна преобразования напряженности магнитного поля в энергетический уровень; l_x — средняя длина замкнутого контура волновода по которому движутся электроны, м; l_0 — нормированная по значению длина контура волновода, равная 1 м; S_0 — нормированная по значению площадь поверхности материала волновода, на который действует магнитное поле, 1 м²; S_x — реальная площадь исследуемого материала волновода, м².

Для контроля магнитного потока в контуре весьма важно знать значение индуктивности соленоида. Индуктивность L_c соленоида определяется на основе закона Био – Саварва – Лапласа, согласно которому между полным магнитным потоком $\Phi_x(t)$ и силой тока $I_x(t)$ существует линейная (прямо пропорциональная) зависимость:

$$\Phi_x(t) = L_c I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right]. \quad (16)$$

Для однородного магнитного поля полный магнитный поток соленоида

$$\Phi_x(t) = B_x(t) S_k N_B = \mu_0 \mu H_x(t) S_k N_B = \mu_0 \mu H_x(t) S_k n_B l_c, \quad (17)$$

где S_k — площадь витка соленоида ($S_k = \pi R^2$), а $H_x(t)$ определяется из выражения (9).

Поскольку напряженность магнитного поля соленоида зависит от координаты l_x (рис. 1), то, как показано в [6], аналитическое выражение для магнитного потока выводится методом дифференцирования и

последующего интегрирования функции (16) по всей длине соленоида. В результате получают:

$$\Phi_x(t) = \int_0^{l_c} \mu_0 \mu H_x(t) S_K n_B dl_c = \mu_0 \mu S_K n_B^2 I_m \left(\sqrt{R^2 - l_c^2} - R \right) \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right]. \quad (18)$$

Зная параметры соленоида, не сложно определить его индуктивность:

$$L_c = \mu_0 \mu S_K n_B^2 \left(\sqrt{R^2 - l_c^2} - R \right). \quad (19)$$

Из уравнения величин (19) видно, что индуктивность соленоида зависит не только от параметров (формы и размеров), но и от магнитных свойств окружающей среды. Нужно помнить, что если средой, заполняющей соленоид, является ферромагнетик, то индуктивность соленоида будет зависеть от силы тока, создающего магнитное поле в соленоиде, т.е. и от интенсивности намагничивания ферромагнетика.

В том случае, когда длина соленоида сравнима с его диаметром ($l_c \approx k_2 R$), то индуктивность определяется согласно уравнению величин [10]:

$$L_c = \mu_0 \mu S_K n_B^2 \left(1 - k_2^3 R / (k_2 + 1) \pi l_c \right). \quad (20)$$

Зная значение индуктивности, не сложно определить ЭДС самоиндукции по известному уравнению величин

$$\varepsilon = -L_c \frac{d[i_c(t)]}{dt} = -L_c I_m \frac{d}{dt} \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^N \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right]. \quad (21)$$

На сегодняшний день отсутствуют приборы и методы измерения уровней Ландау. Ниже рассматриваются предложенные и описанные в работе [9] магнитопольевые методы и измерители энергии дискретных энергетических уровней Ландау.

2. Магнитопольевой метод измерения энергии дискретных энергетических уровней Ландау

В основу метода, как и других, описанных выше магнитопольевых методов измерения физических величин, положен эффект силового воздействия вектора напряженности соленоидального импульсного магнитного поля высокой или сверхвысокой частоты на, прежде всего, отрицательно заряженные квазичастицы (электроны) исследуемого материала, приводящего как к высвобождению энергии электронов (в виде адекватной энергии радиоимпульса) при переходе с одного энергетического уровня на другой, так и к возникновению электродвижущей силы (ЭДС), пропорциональной энергии соответствующего уровня Ландау.

Метод разработан для измерения уровней Ландау любых материалов макромира и при нормальных условиях проведения измерений, не требующих сверхнизких температур.

От прямых измерений метод отличается тем, что для его осуществления априори создаются такие физические условия проведения измерений, при которых выполняются, прежде всего, законы сохранения механической и электромагнитной энергии в веществе, и закон электромагнитной индукции Фарадея, обеспечивающие фундаментальные взаимодействия импульсного магнитного поля с электронами исследуемого материала. Для реализации этих условий из исследуемого материала изготавливаются монолитный плоский двухконтурный волновод замкнутого типа и передающая антенна, а из диэлектрика — одну-две цилиндрические катушки индуктивностей, формирующие соленоидальное векторное поле.

Одновитковые колебательные контура выполняются идентичными по форме, по классу точности обработки поверхности, по размерам (площади поверхности и объема) и по значениям электрических параметров (индуктивности и собственной емкости). Антенна, как правило, выполняется априори в виде одного витка и с параметрами, идентичными параметрам одновитковых контуров волновода. На практике передающую антенну устанавливают на волновод путем использования механического соединения или пайки.

Контура плоского волновода и цилиндрические катушки индуктивности помещаются в магнитный экран, например, в ферритовые броневи сердечники. Антенна, естественно, не экранируется (рис. 2).

Сущность метода заключается в следующем. Вначале формируется соленоидальное импульсное магнитное поле высокой или сверхвысокой частоты. Для этого используется ток соответствующей частоты в виде прямоугольных импульсов (типа меандр). Данный ток пропускается, с низкой частотой коммутации, через соленоид с известными параметрами. В результате на торце соленоида формируется соленоидальное импульсное магнитное поле заданной частоты и напряженности.

Силовые линии напряженности соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты направляются перпендикулярно поверхности первого из двух плоских одновитковых контуров волновода (рис. 2).

Под действием указанного магнитного поля и сил Лоренца осуществляется колебательно-вращательно-поступательное движение электронов по замкнутому контуру волновода.

На рис. 2 сплошной линией со стрелками показано движение электронов слева на право через первый и второй плоские одновитковые колебательные контура, образующие большой замкнутый контур. Через передающую антенну электроны не проходят, поскольку движутся в противоположных направлениях (см. на рис. 2 стрелки по контуру передающей антенны).

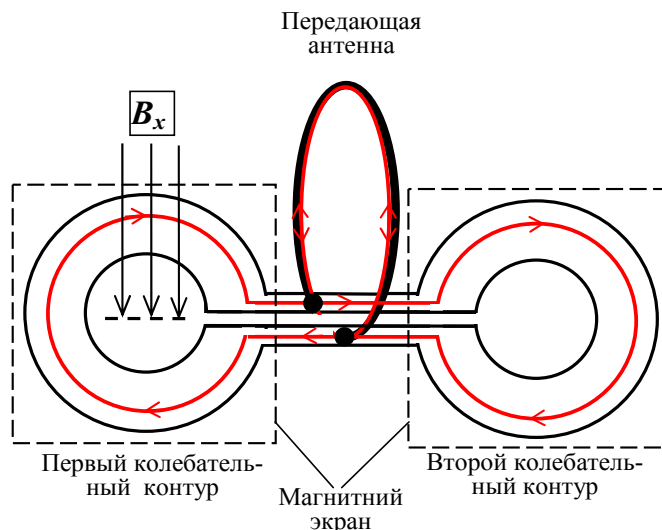


Рис. 2. Графическое представление процесса передачи энергии по замкнутому контуру волновода

Согласно [12], в современном понятии о орбитальной модели атома, электроны в атоме обладают только определенными значениями энергии, и переходят с одного энергетического уровня на другой только скачкообразно. Разница между энергетическими уровнями определяет частоту кванта света или высокочастотного радиоимпульса, который излучается или поглощается при переходе электронов с одного энергетического уровня на другой. Каждой паре значений главного квантового числа n и орбитального квантового числа l соответствует определенный уровень энергии, которым может обладать электрон.

Для передачи энергии дискретного энергетического уровня Ландау в адекватную энергию радиоимпульса необходимо создать условия для высвобождения энергии электронов при скачкообразном переходе их с одного энергетического уровня на другой.

Физически эти условия обеспечиваются путем подключения передающей антенны. Антенна располагается перпендикулярно плоскости поверхности волновода замкнутого типа и только в геометрическом центре соединения первого и второго одновитковых контуров. В этом центре имеет место наибольшая плотность энергии электрического поля (рис. 2, рис. 3).

Для получения информации об уровнях Ландау, скачкообразно, шаг за шагом, осуществляется изменение напряженности соленоидального импульсного магнитного поля на заданные дискретные значения до определенного момента времени, при котором происходит мгновенный переход электронов с одного энергетического уровня Ландау на другой. В результате формируется радиоимпульс, который, с помощью антенны, передается (излучается) в открытое пространство.

Физически процесс излучения радиоимпульсов объясняется графическим изображением, приведенным на рис. 3 в виде линии со стрелками. В момент мгновенного перехода электронов с одного дискретного энергетического уровня Ландау на другой прекращается действие соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты на первый одновитковый колебательный контур волновода (сравни рис. 2 и рис. 3).

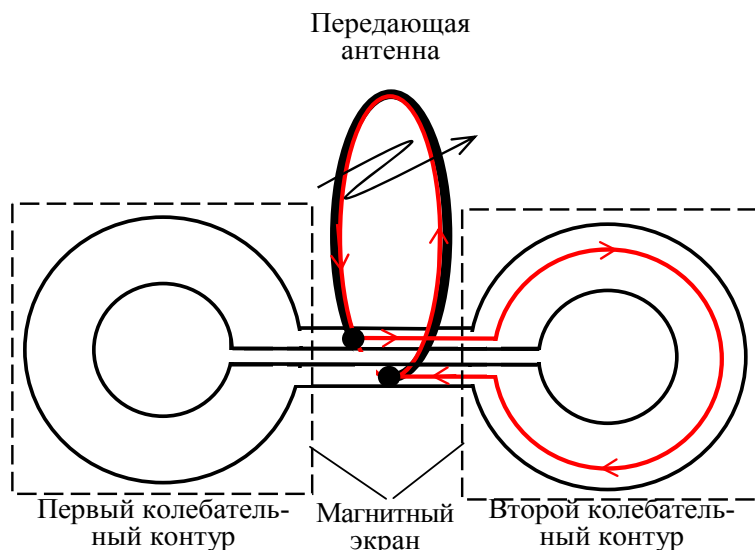


Рис. 3. Графическое представление процесса излучения радиоимпульса при переходе отрицательно заряженных квазичастиц с одного энергетического уровня Ландау на второй и мгновенном прекращении действия импульсного магнитного поля на левый одновитковый контур волновода

Накопленная во втором одновитковом колебательном контуре энергия электромагнитного поля мгновенно поступает в передающую антенну (рис. 3). На рис. 3 линия со стрелками показывает прохождение электронов через второй одновитковый колебательный контур в передающую антенну. В антенне генерируются ограниченные во времени затухающие колебания высокой частоты в виде радиоимпульса, длительность которого обусловлена полосой пропускания передающей антенны, ограничивающей количество волн высокочастотных колебаний тока в данном контуре, параметры которого, как было отмечено выше, установлены идентичными параметрам первого или второго контура волновода.

Следует отметить, что энергия (мощность) радиоимпульса зависит от разности энергий указанных дискретных энергетических уровней Ландау и, соответственно, от числа (и энергии) электронов в них, а также от омических потерь в антенне, от наводок внешних полей и от потерь на излучение,

Мгновенный переход отрицательно заряженных квазичастиц с одной дискретного энергетического уровня Ландау на другой осуществляется в определенные моменты времени, в которые дискретное уменьшение или увеличение напряженности импульсного магнитного поля высокой частоты превышает определенный порог действия силовых линий импульсного магнитного поля.

Излучаемые радиоимпульсы принимаются антенной Ант 2 и поступают, например, на анализатор спектра АС (рис. 4). С помощью последнего определяются параметры радиоимпульса, переданного в определенный момент времени.

Для получения удобного для измерений и контроля электрического сигнала, несущего информацию о дискретном энергетическом уровне Ландау, используется вторая катушка индуктивности L_2 (рис. 4).

Через волновод ВВ катушки индуктивности L_1 и L_2 связаны между собой с помощью индуктивных и емкостных связей (рис. 4, контура L_1 и L_3 , L_2 и L_4). Благодаря этим связям, во втором (приемном) высокочастотном колебательном контуре наводится высокочастотная электродвижущая сила (ЭДС) с амплитудой, пропорциональной энергии дискретного энергетического уровня Ландау. При необходимости полученный высокочастотный сигнал трансформируется с априори заданным коэффициентом трансформации или усиливается с помощью усилителя.

Сигнал $u_{Li}(t)$ с выхода колебательного контура L_2 поступает на измеритель среднего значения ИН (рис. 4), где выпрямляется с помощью, например, однополупериодного выпрямителя, усредняется (фильтруется) на RC-нагрузке и измеряется. Математически процесс получения среднего значения напряжения описывается уравнением величин:

$$U_{cpn} = \frac{R_n}{T'_k} \int_0^{T'_k} |i_{nk2}(t)| dt = \frac{k_1}{T'_k} \int_0^{T'_k} |u_{L_n}(t)| dt = S_{n1} E'_{L_n}, \quad (22)$$

где $T'_k = nT_k$ — время интегрирования кратное периоду частоты коммутации ($n=1-10(100)$) и более; R_n — сопротивление RC-нагрузки; $i_{nk2}(t)$ — ток в выходном колебательном контуре, соответствующий n -у дискретному энергетическому уровню Ландау; S_{n1} — крутизна преобразования энергии дискретного энергетического уровня Ландау в напряжение; E'_{L_n} — n -й дискретный энергетический уровень Ландау.

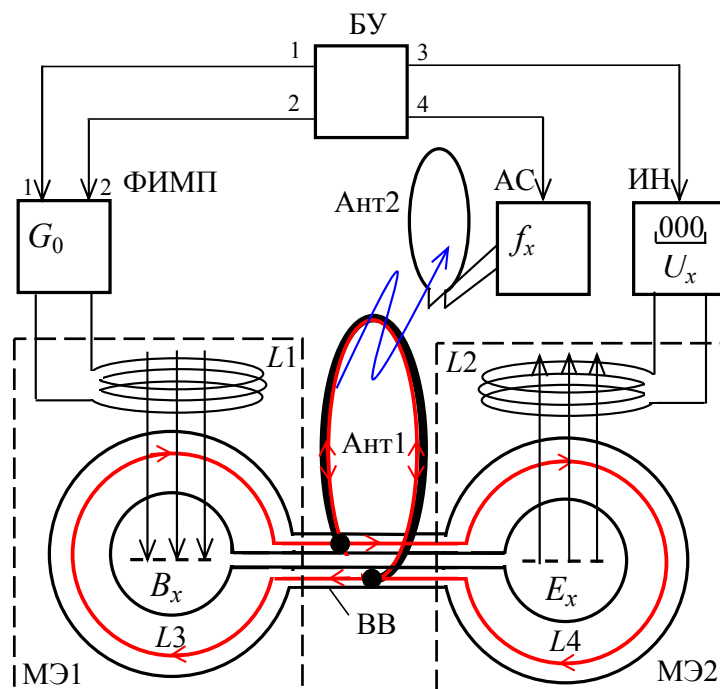


Рис. 4. Упрощенная комбинированная схема магнитополевого преобразователя

Каждому дискретному значению напряженности импульсного магнитного поля соответствует определенное значение напряжения (21).

В процессе измерений определяется, подсчитывается и запоминается общее количество дискретных энергетических уровней Ландау для всего диапазона дискретных значений напряженности импульсного магнитного поля высокой частоты.

Процесс определения дискретных уровней Ландау и параметров радиоимпульсов повторяется до тех пор, пока уменьшение напряженности соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты не приводит к последнему скачкообразному переходу электронов на новый энергетический уровень Ландау (рис 5, а). По полученным данным строится, в виде огибающей, зависимость выходного сигнала измерителя напряжения ИН (вольтметра) от входного сигнала. Последний выражается в вольтах и обеспечивает дискретное (шаг за шагом) изменение тока, а, следовательно, и напряженности импульсного магнитного поля высокой частоты (рис. 5, рис. 6 и рис. 7).

На рис. 5, рис. 6 и рис. 7 приведены графические построения, отражающие результаты экспериментальных исследований уровней Ландау для случаев выполнения волновода из металлов. Анализ полученных результатов показал, что: 1) для металлов уровни Ландау эквидистантны; 2) наблюдается 4-5 и даже 6 радиоимпульсов; 3) огибающая начальных точек уровней Ландау носит кубический или квадратичный характер; 4) огибающая является нисходящей функцией в заданной системе шкал.

Для плоского двухконтурного волновода замкнутого типа, выполненного из меди толщиной 2,5 мм и площадью поверхности равной 1875 мм², экспериментально было установлено шесть дискретных энергетических уровня Ландау (см. рис. 5, а). Результаты измерений приведены в виде совокупности горизонтально расположенных прямоугольников. Для волновода, выполненного из меди толщиной 0,5 мм, экспериментально было установлено пять дискретных энергетических уровня Ландау (рис. 6). Марка меди в обоих случаях не была известной.

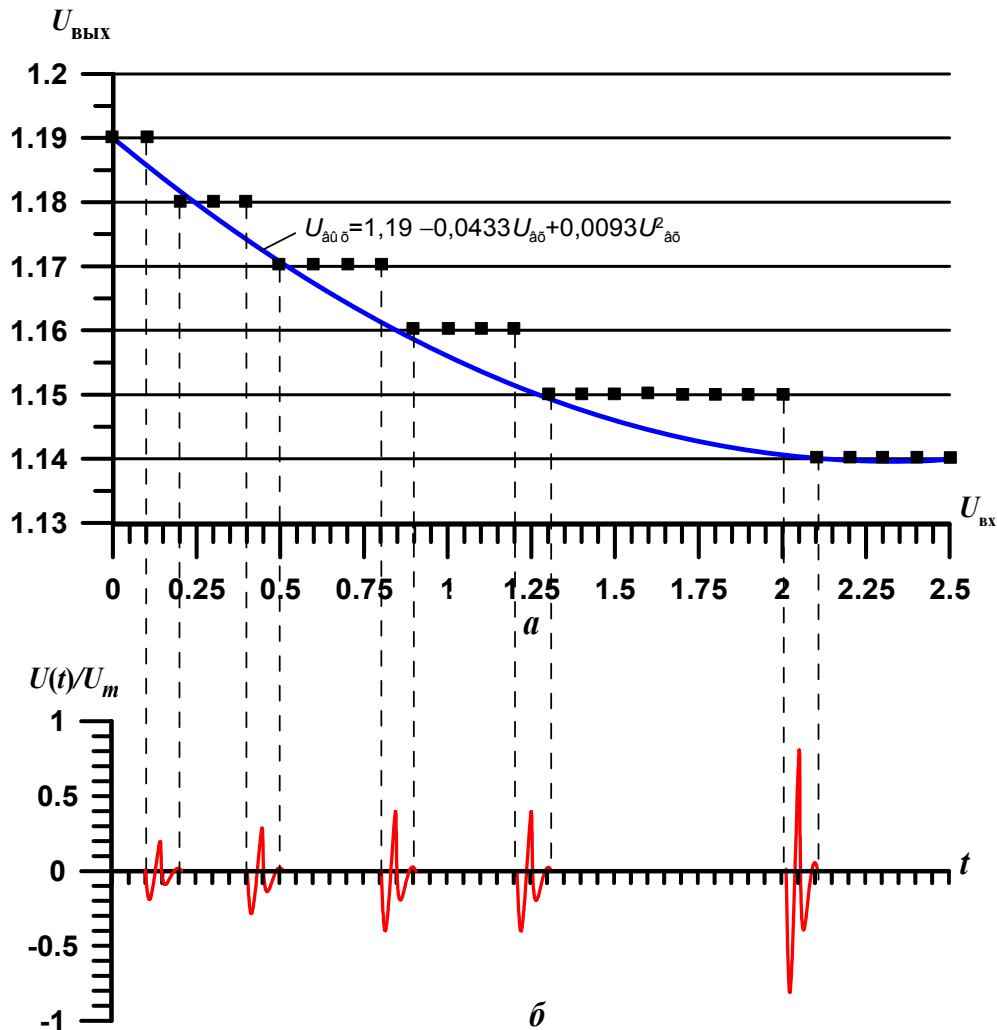


Рис. 5. Графическое изображение процесса излучения радиоимпульсов при переходе электронов с одного энергетического уровня Ландау на другой (волновод выполнен из меди толщиной 2,5 мм)

Огибающие энергетических уровней Ландау имеют линейную и квадратичную (рис. 5, а) линейную и кубическую (рис. 6, а) составляющие. Экспериментально полученные результаты подтвердили равноудаленность (эквидистантность) дискретных энергетических уровней Ландау.

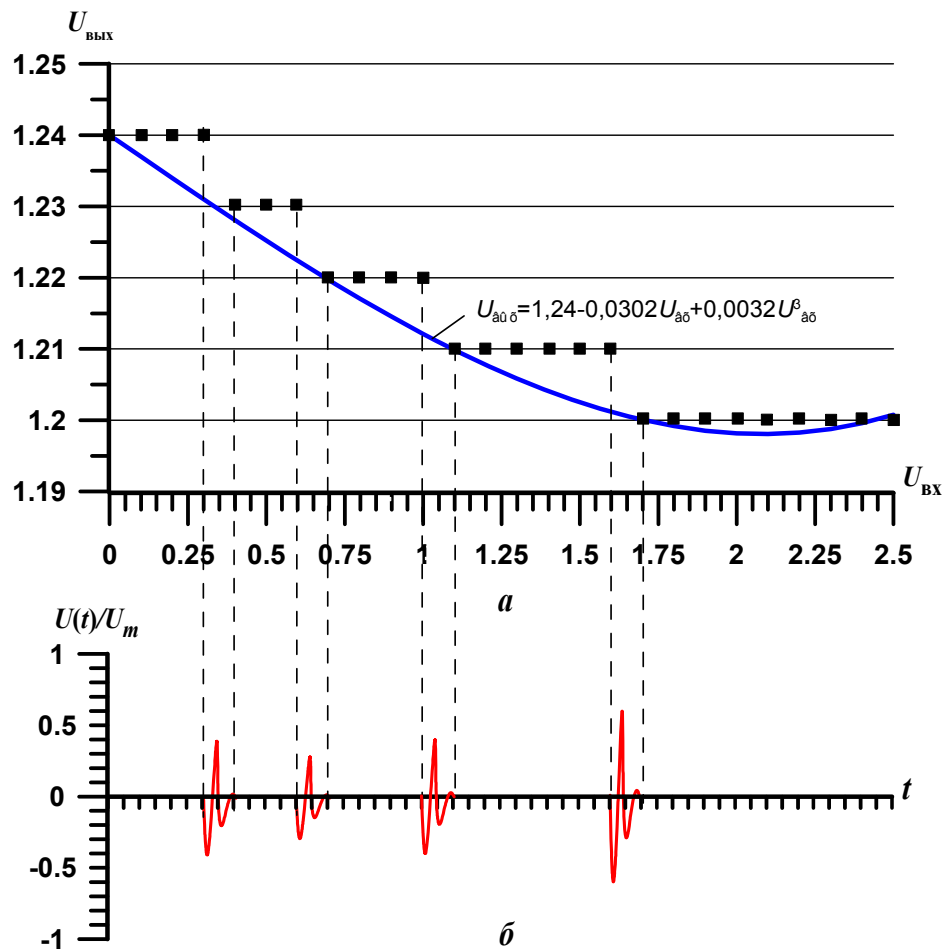


Рис. 6. Графические изображения процесса излучения радиоимпульсов при переходе электронов из одного энергетического уровня Ландау на другой (волновод выполнен из меди толщиной 0,5 мм)

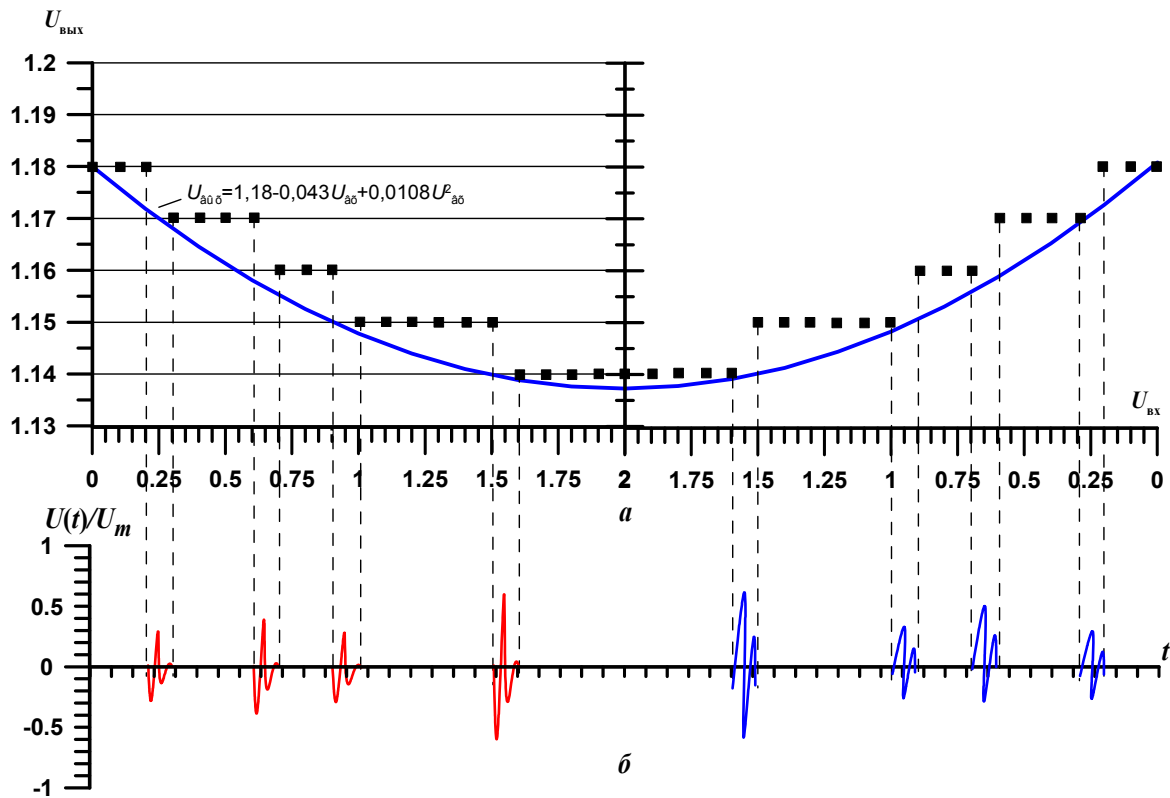


Рис. 7. Графические изображения характера изменения дискретных энергетических уровней Ландау и процесса излучения радиоимпульсов во времени

Дополнительно на рис. 7 графически показаны процессы излучения во времени радиоимпульсов

при переходе электронов с одного энергетического уровня Ландау на другой в режиме дискретного (шаг за шагом) уменьшение (левая часть графика) и увеличение (правая часть графика) уровня напряженности импульсного магнитного поля, действующего на волновод.

Следует отметить, что спектр радиоимпульса определяется основной высокой частотой импульсного магнитного поля и его гармониками, количество которых ограничивается полосой пропускания (прозрачности) антенны.

Описанный магнитолевой метод измерения уровней Ландау обеспечивает достаточно высокую точность определения напряжения и значений параметров радиоимпульса. Это достигается за счет:

создания технических, технологических и методических условий для осуществления управляемого движения отрицательно заряженных квазичастиц в магнитном поле, т.е. за счет использования волноводов замкнутого типа, выполненных из образцов исследуемых материалов с одинаковой формой и параметрами, а также за счет использования априори определенной совокупности методов и средств преобразования физических величин;

экранирования контуров волновода и катушек индуктивности от действия внешних магнитных полей;

формирования импульсного магнитного поля заданной формы и частоты и, как следствие, — одновременном формировании стоячей и бегущей волн в волноводе;

определения и установления условий управляемого взаимодействия отрицательно заряженных квазичастиц материала с импульсным магнитным полем;

использования передающей антенны с параметрами, идентичными параметрам одновитковых колебательных контуров волновода, которая не экранирована от воздействия внешних магнитных полей и служит для передачи (высвобождения) энергии в окружающее пространство;

формирования сигналов с использованием энергии отрицательно заряженных квазичастиц материала, то есть сигналов электрической природы, параметры которых могут быть измерены обычными приборами;

простой реализации метода измерения энергии дискретных энергетических уровней Ландау и получения достоверных результатов при нормальных температурных условиях проведения измерений.

3. Схемотехнические решения магнитолевых измерителей дискретных энергетических уровней Ландау

Экспериментально установлено, что, при измерениях уровней Ландау в материалах макромира, эффективное проявление физического явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество имеет место при выполнении следующих условий:

1) в макромире из исследуемого материала, являющимся источником конечного множества электронов и других отрицательно заряженных квазичастиц в единице объема, изготавливается функциональный элемент измерительной системы, прибора или измерительного преобразователя — волновод или резонатор ;

2) из образцов исследуемого материала изготавливаются стандартные образцы волноводов одного или нескольких типоразмеров (разных площадей, толщин, классов точности обработки поверхности и т.п.);

3) конструктивно каждый волновод должен быть выполненным в виде физической системы замкнутого типа;

4) функциональный элемент должен представлять собой плоский двухконтурный волновод с одним или конечным числом n витков в каждом контуре; предпочтительно их одинаковое количество и исполнение, — диаметр контуров волновода должен превышать его толщину;

5) параметры плоских одновитковых волноводов должны быть нормированными как по значениям площади по-верхности, объема и класса точности обработки поверхности, так и по значениям индуктивности и собственной емкости контуров;

6) в волноводах должны быть предусмотрены элементы соединения их с передающей антенной;

7) типоразмеры волноводов должны выбираться с учетом типоразмеров ферритовых броневых сердечников или иных стандартных магнитных экранов;

8) промышленное изготовление волноводов должно осуществляется по априори разработанным техническим условиям на волноводы и на соответствующие им магнитные экраны, т.е. как на конструктивно законченный электромеханический узел;

9) работа магнитолевых измерительных преобразователей при низких температурах не требует изменений в конструкции волновода при условии, что исследуемый материал не меняет свои электромеханические параметры и характеристики или они изменяются в допустимых пределах.

Описанный выше метод измерений дискретных энергетических уровней Ландау был проиллюстрирован на упрощенном варианте комбинированной схемы магнитолевого измерителя.

Ниже рассматриваются новые варианты реализации магнитолевого метода измерения дискретных уровней Ландау на базе схемотехнического решения магнитолевого измерительного преобразователя физических величин, описанного в работе [11]. Особенностью указанного преобразователя является полная симметрия схемотехнического решения.

1-й вариант. На рис. 8 приведена комбинированная схема не сложного в исполнении магнитолевого измерителя дискретных уровней Ландау без использования микроконвертора или

микропроцессора.

В приведенном на рис. 8 схематическом решении магнитолевой измерительный преобразователь дополнен передающей и приемной антеннами Ант1 и Ант2. Передающая антенна Ант1 подключена к волноводу в его геометрическом центре, а приемная антенна Ант2 — ко входу антенного усилителя Ус. В схеме предусмотрена возможность подключения внешнего анализатора спектра или высокочастотного осциллографа.

Источник питания ИП формирует: микроток, подаваемый на вход «1» высокочастотного колебательного контура $L1$ для обеспечения отрицательной обратной связи по магнитному потоку; напряжение питания транзисторного ключа $VT1$; напряжение питания антенного усилителя Ус, цифрового вольтметра ЦВ и генератора частоты коммутации ГЧК.

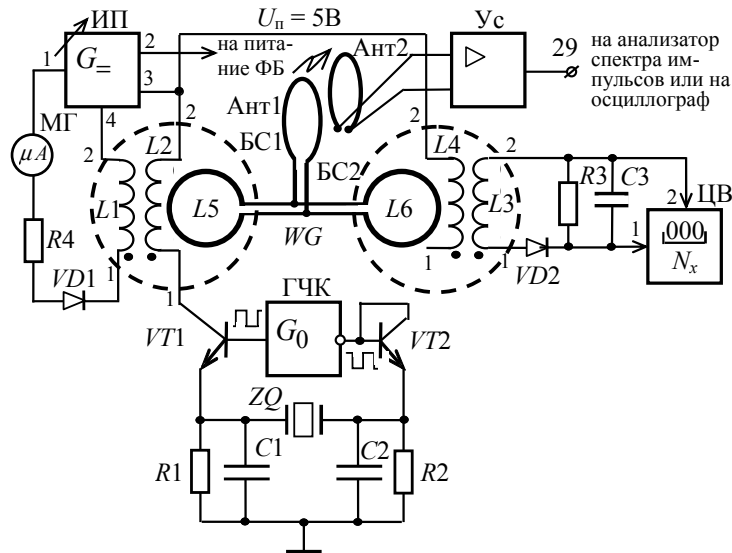


Рис. 8. Функциональная схема магнитолевой измеритель уровней Ландау (не сложный в реализации вариант)

После включения источника питания ИП, на парафазных выходах кварцованного генератора ГЧК низкой частоты коммутации появится сигнал типа меандр, который подается на базы транзисторных ключей $VT1$ и $VT2$ и поочередно включает их. При прохождении тока через резисторы $R1$ и $R2$ возникает падение напряжений на них. Разница этих напряжений возбуждает высокочастотный кварцевый резонатор ZQ , который, благодаря наличию конденсаторов $C1$ и $C2$, начинает генерировать высокочастотные колебания (рис. 8). В результате на выходе коллектора транзисторного ключа $VT1$ формируются пакеты импульсов высокочастотного сигнала типа меандр.

Под действие этого сигнала в катушке индуктивности $L2$ первой пары высокочастотных колебательных контуров возникает соленоидальное импульсное магнитное поле высокой частоты. Значение напряженности этого поля зависит от значений двух токов: 1) тока, обусловленного напряжением на выходе «3» ИП; 2) тока от наведенной электродвижущей силы в катушке индуктивности $L1$. Необходимо отметить, что электродвижущая сила наводится за счет взаимной индукции между катушками индуктивности $L1$ и $L2$. При одинаковом числе витков, т.е. при коэффициенте трансформации $k_{тр} = 1$, в катушке индуктивности $L1$ будет наводиться электродвижущая сила того же значения, что и высокочастотный сигнал на катушке индуктивности $L2$. Причем направления первого и второго (наведенного) токов устанавливаются противоположными, (токи текут в разные стороны). Первый ток, выпрямленный диодом $VD1$ и ограниченный резистором $R4$, противодействует другому току, который течет в катушке индуктивности $L2$.

С помощью катушки индуктивности $L2$ формируется соленоидальное импульсное магнитное поле высокой частоты и практически прямоугольной формы. Линии напряженности этого поля направлены перпендикулярно плоскости первого плоского одновиткового контура $L5$ монолитного волновода WG (рис. 8). В результате дискретного изменения напряженности магнитного поля, его силовое действие на электроны исследуемого материала уменьшается или увеличивается, обеспечивая, при определенных значениях напряженности, формирование дискретных энергетических уровней Ландау сложной трехмерной формы. Практически это достигается путем подачи на катушку индуктивности $L1$ дискретно возрастающего напряжения с шагом, например, 0,1 В (рис. 6, в), которое устанавливается на выходе «1» ИП, подключенного к выводу «1» катушки индуктивности $L1$,

На рис. 6, а приведены графические изображения процессов формирования дискретных энергетических уровней Ландау, а на рис. 6, б — моменты времени излучения радиоимпульсов при переходе электронов с одного энергетического уровня на другой.

Приведенные на рис. 9, в дискретные значения входных ($U_{вх} = U_1$) и выходных ($U_{вых}$) напряжений (0,4 В, 0,7 В, 0,11 В, 0,17 В и 1,24 В, 1,23 В, 1,22 В, 1,21 В) получены экспериментально при использовании

монолитного волновода WQ (рис. 3), выполненного из образца листовой меди толщиной 0,5 мм.

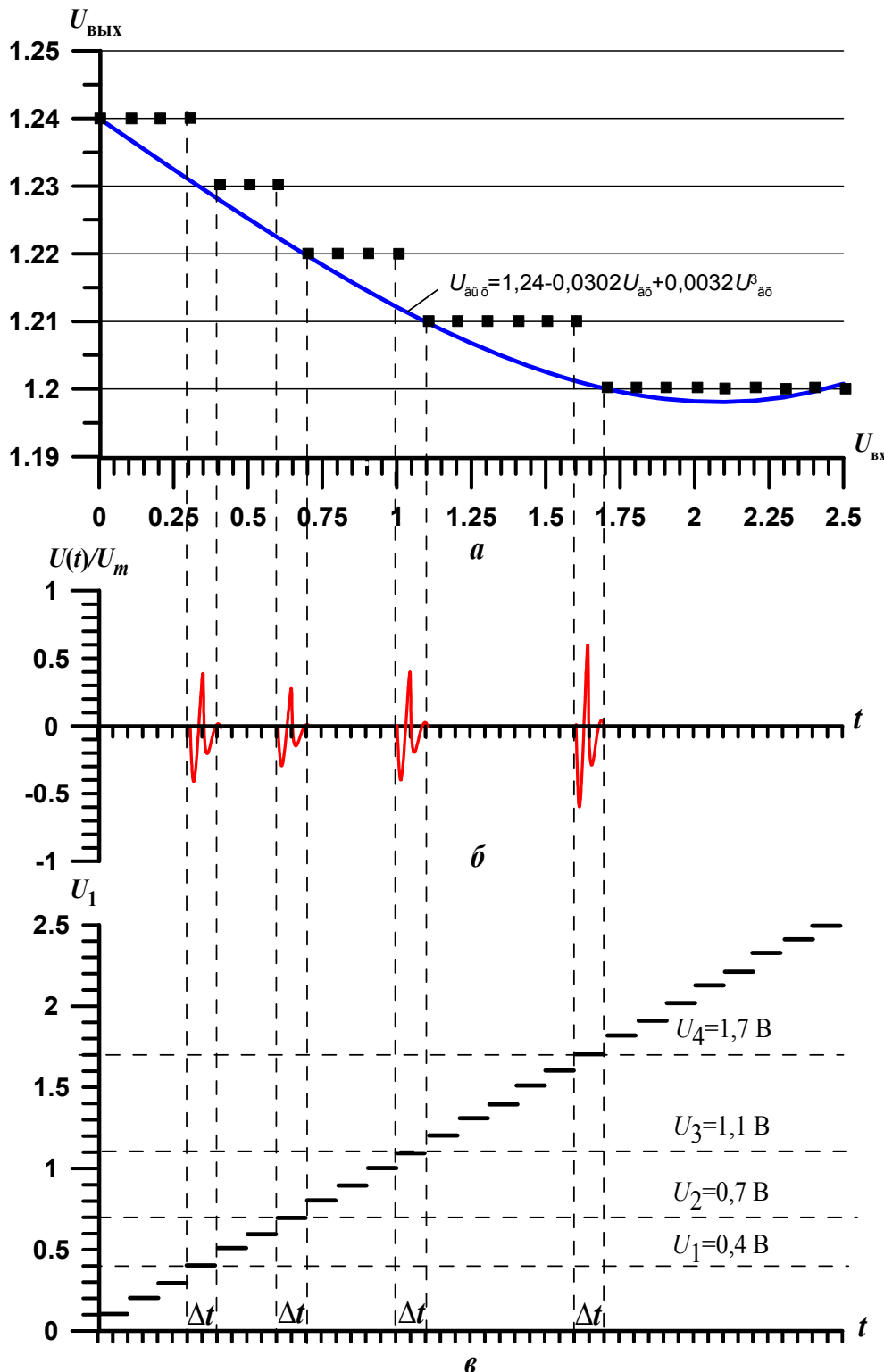


Рис. 9. Графические изображения процесса формирования дискретных энергетических уровней Ландау и радиоимпульсов

Благодаря воздействию на материал волновода пачек импульсов магнитного поля с низкой частотой следования, в нем формируется, на наш взгляд, объемная стоячая электромагнитная волна, максимум и минимум которой совпадает с геометрическими центрами катушек индуктивности L_1 , L_2 и L_3 , L_4 . Максимумы и минимумы (энергии) стоячей волны колеблются поперек плоскости волновода WG и обладают свойством сохранения накопленной энергии. Поочередное изменение максимума на минимум, а минимума на максимум (энергии) стоячей волны напоминает работу двухпоршневого насоса. Это обусловило введение и использование в технической литературе термина «энергетический насос», который характеризует процесс изменения энергии в заданном объеме материала (или вещества) под периодическом

воздействием импульсного магнитного поля высокой частоты.

За счет воздействия импульсного магнитного поля высокой частоты в волноводе создается, «наложенная» на объемную стоячую волну, объемная бегущая (продольная) электромагнитная волна, обусловленная сложным колебательно-вращательно-поступательным движением электронов соответствующего энергетического уровня

Ландау. Ее движение осуществляется непрерывно по замкнутому контуру волновода.

Благодаря периодическому действию силовых линий напряженности импульсного магнитного поля высокой частоты обеспечивается периодическая передача (перекачка) энергии электромагнитного поля первого одновиткового контура ($L5$) во второй ($L6$), т.е. с левой части материала волновода в правую с одновременным наведением электродвижущей силы в катушке индуктивности $L4$. Из катушки индуктивности $L4$ сигнал трансформируется в катушку индуктивности $L3$. С выхода колебательного контура $L3$ сигнал $u_{Li}(t)$ поступает на измеритель среднего значения напряжения ИП (рис. 8), где выпрямляется с помощью, например, однополупериодного выпрямителя, усредняется (фильтруется) на RC -нагрузке и измеряется. Математически процесс получения среднего значения напряжения описывается уравнением величин (6).

Действующее значение энергетического уровня Ландау, приведенное, согласно СИ, к единице пути (к 1 м) и к единице площади (к 1 м^2), определяется, при нормальных условиях выполнения измерений, согласно уравнению величин [11]

$$E_{LL} = s_{\text{пр}} \frac{S_0}{S_x} \frac{U_x^2 t_x}{R_H} \frac{l_0}{l_x} \text{эВ} = s_{\text{пр}} \frac{l_0}{l_x} \frac{S_0}{S_x} \frac{U_x^2 t_x}{R_H} \text{эВ} = s'_{\text{пр}} \frac{U_x^2 t_x}{R_H} \text{эВ}, \quad (23)$$

где E_{LL} — энергетический уровень Ландау; $s_{\text{пр}}$ — крутизна преобразования, эВ/Дж; l_x — средняя длина замкнутого контура волновода по которому движутся электроны, м; l_0 — нормированная по значению длина контура волновода, равная 1 м ; S_0 — нормированная по значению площадь поверхности материала волновода, на который действует магнитное поле, 1 м^2 ; S_x — реальная площадь исследуемого материала волновода, м^2 ; $t_x = n\tau_0$ — время усреднения; $n = 1, 2, 3, \dots$; τ_0 — постоянная времени интегрирования ($\tau_0 = 1\text{ с}$); $U_x = U_{\text{хсв}}$; R_H — сопротивление RC -нагрузки; $s'_{\text{пр}} = s_{\text{пр}}/l_x S_x$ эВ/Дж при $l_0 = 1\text{ м}$, $S_0 = 1\text{ м}^2$.

При измерениях определяется, подсчитывается и запоминается общее количество дискретных энергетических уровней Ландау для всего диапазона заданных дискретных значений напряженности импульсного магнитного поля высокой частоты.

2-й вариант. На рис. 10 приведена комбинированная схема магнитополевого измерителя дискретных уровней Ландау с использованием микроконвертора. При прочих идентичных функциональных блоках схем измерителей, приведенных на рис. 8 и рис. 10, в последнюю из них введен микроконвертор МК с клавиатурой КЛ, оперативным запоминающим устройством ОЗУ и цифровым отсчетным устройством ЦОУ, анализатор спектра АС и усилитель мощности УМ, а также триггер, включенные, как показано на рис. 10.

Введение МК позволило: программным путем задавать и контролировать значение напряжения питания, подаваемого на коллектор первого транзисторного ключа $VТ1$, задавать частоту коммутации и формировать соответствующий сигнал на выходе «д» порта $P1$ МК; измерять (преобразовывать в код числа) напряжение на выходе RC -нагрузки, которое через вход «в» коммутатора порта $P0$ подается на вход встроенного в МК аналого-цифрового преобразователя; задавать на выходе «б» порта $DA2$ напряжение, подаваемое на колебательный контур $L1$ для формирования сигнала обратной связи по магнитному потоку; осуществлять запоминание всех результатов измерений в оперативном запоминающем устройстве ОЗУ; отображать полученные данные на цифровом отсчетном устройстве ЦОУ и, при необходимости, изменять входные данные и программу работы магнитополевого измерителя с помощью клавиатуры КЛ.

С целью расширения функциональных возможностей описанного магнитополевого измерителя в части измерения не только энергии дискретных энергетических уровней Ландау, но и энергии Ферми каждого уровня, а также других физических величин, было предложено ввести в измеритель автоматический переключатель АП и кодоуправляемый преобразователь «код-перемещение» ПКП. Последний используется для обеспечения автоматического подключения и отключения передающей антенны Ант1 от волновода WQ . При этом автоматический переключатель АП управляется по заданной программе сигналом с выхода «д» порта $P1$ МК, а ПКП — цифровыми сигналами, поступающими через общую шину ОШ с выходов порта $P3$ МК.

3-й вариант. Для обеспечения возможности дискретного изменения частоты импульсного магнитного поля, видоизменена схема генератора пачек импульсов. Вместо симметричного двухтактного генератора в магнитополевым измерителе, схема которого приведена на рис. 5, используется обычная широкодиапазонная схема кварцованного генератора КГ.

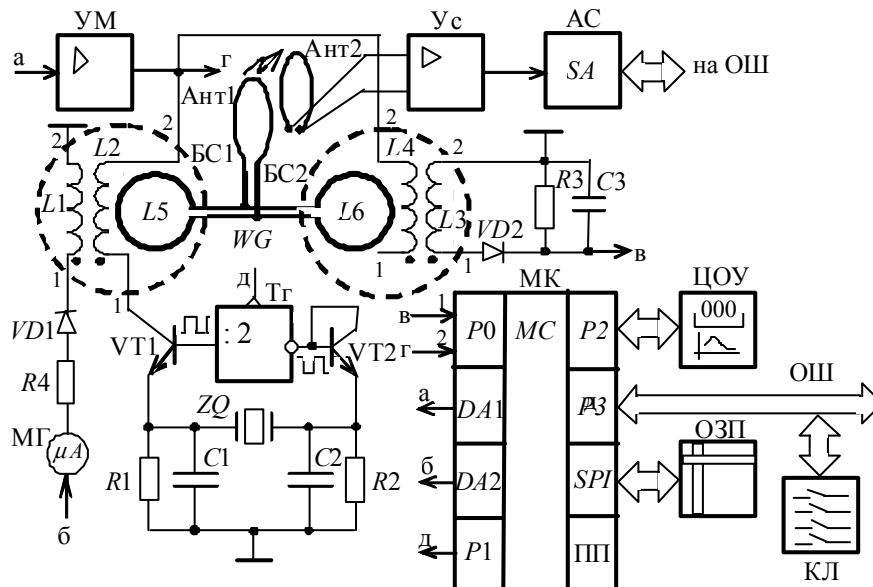


Рис. 10. Комбинированная схема магнитополевого измерителя дискретных энергетических уровней Ландау с микроконвертором

Замена одного кварцевого резонатора на другой и обеспечивает смену частоты импульсного магнитного поля на выходе катушки индуктивности $L2$. Подача сигнала высокой частоты с выхода КГ на базе транзисторных ключей $VT1$ и $VT2$ осуществляется через логические элементы ЛЭ1 и ЛЭ2, которые управляются выходными сигналами триггера Тг. Для обеспечения симметрии сигнала, счетный вход триггера подключен к выходу порта P0 МК.

Магнитополевному измерителю, выполненному по схеме, приведенной на рис. 11, присущи три режима работы: 1) измерение дискретных энергетических уровней Ландау; 2) измерение энергии Ферми; 3) измерение физических величин разной природы.

Первый режим работы обеспечивается при функциональных блоках, соединенных как показано на рис. 11; второй — при отключенной передающей антенне Ант1 и положении АП, противоположном указанному на рис. 11. Третий режим работы осуществляется при отключенной передающей антенне Ант1 и при положении АП, указанному на рис. 11. При этом используются сенсоры с выходом по току или по напряжению, т.е. типа «физическая величина – ток (напряжение)».

Более подробно указанные измерители описаны в работе [12].

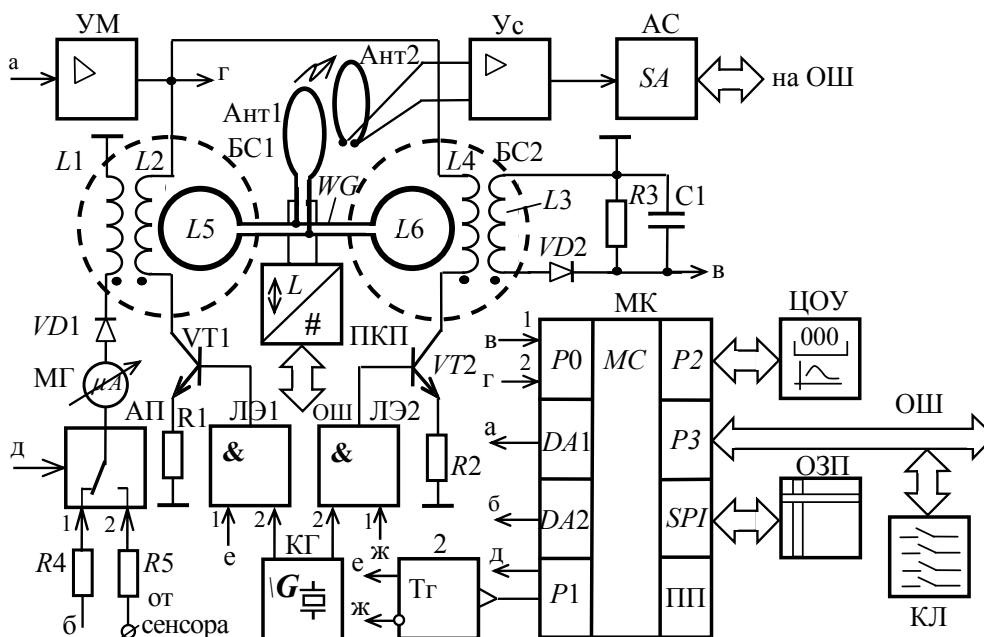


Рис. 11. Функциональная схема магнитополевого измерителя дискретных энергетических уровней Ландау с расширенными функциональными возможностями

В целом, магнитополевые измерения обогатились новыми техническими решениями измерителей физических величин энергетической, вещественной и информационной групп.

Выводы. Квантование Ландау характеризует колебания электронных свойств материалов в зависимости от значения индукции приложенного магнитного поля.

Орбитальные энергетические уровни или уровни Ландау впервые получены им в 1930 году как решение уравнения Шрёдингера. Количество электронов на уровне прямо пропорционально силе приложенного магнитного поля.

Нами экспериментально установлено, что дискретные энергетические уровни Ландау существуют не только в металлах, но и в диэлектриках. Это указывает на то, что в диэлектриках (в условно проводящих и в слабо проводящих материальных средах) может наблюдаться диамагнетизм электронов переноса.

Существование связи уровня Ландау с магнитной индукцией позволяет получить уравнение величин для энергии n -го уровня Ландау, удобное для анализа.

На сегодняшний день отсутствуют промышленные приборы для измерения дискретных энергетических уровней Ландау и энергий Ферми материалов.

Уравнение измерений напряженности магнитного поля соленоида выводят на основе закона Био – Савара – Лапласа с учетом принципа суперпозиции магнитных полей системы элементарных круговых токов.

Получены аналитические выражения для магнитного потока, напряженности соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты; получено уравнение измерений n -го энергетического уровня Ландау.

Разработан и описан метод измерения дискретных энергетических уровней Ландау любых материалов макромира при нормальных условиях проведения измерений, не требующих сверхнизких температур.

Экспериментально установлено, что для реализации метода априори должны быть созданы физические условия проведения измерений, при которых выполняются, прежде всего, законы сохранения механической и электромагнитной энергии в веществе, и закон электромагнитной индукции Фарадея. Это позволяет обеспечить фундаментальные взаимодействия соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты с электронами исследуемого материала. Для передачи энергии дискретного энергетического уровня Ландау в адекватную энергию радиоимпульса необходимо создать условия для высвобождения энергии электронов при скачкообразном переходе их с одного энергетического уровня на другой. Реализация указанных условий достигается путем изготовления из исследуемого материала монолитного плоского двухконтурного волновода замкнутого типа, передающей антенны, устанавливаемой между контурами волновода, и цилиндрических катушек индуктивностей, формирующих соленоидальное векторное поле.

Показана сущность и особенности методов и средств измерений дискретных энергетических уровней Ландау и их энергий.

Приведены графические построения, отражающие результаты экспериментальных исследований уровней Ландау для случаев выполнения волновода из металлов.

Экспериментально полученные результаты подтвердили равноудаленность (эквидистантность) дискретных энергетических уровней Ландау.

Практически наблюдается 4-5 и даже 6 выбросов радиоимпульсов.

Огибающие уровней Ландау носят кубический или квадратичный характер и являются нисходящими в заданной системе шкал. Получены соответствующие аналитические выражения для огибающих.

Перечислены условия практической реализации магнитополевого метода измерения дискретных энергетических уровней Ландау материалов макромира.

Описаны три варианта схемотехнических решений магнитолевых измерителей уровней Ландау: 1) упрощенный вариант; 2) с использованием микроконвертора; 3) с расширенными функциональными возможностями по измерению физических величин. Показаны различия и преимущества этих решений:

Наибольший практический интерес представляют структуры магнитолевых измерителей уровня Ландау на микроконтроллерах. Микроконтроллеры обеспечивают высокую степень автоматизации процесса измерений и высокую точность измерений.

Полученные результаты расширяют наши представления о магнитолевых методах и средствах измерений уровня Ландау при нормальных условиях проведения этих измерений.

Дальнейшее развитие магнитолевых методов и средств измерений невозможно без проведения ширококомасштабных экспериментальных исследований.

Литература

1. Дубровский И. М. Новая теория электронного газа в магнитном поле и задачи для теории и эксперимента [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ufm.imp.kiev.ua/article/v17/i01/Usp.Fiz.Met.17.053.pdf>.
2. Левитационная плавка [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.youtube.com/watch?v=DkpEz7znpnc>.
3. Квантование Ландау [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://en.m.wikipedia.org/wiki/Landau_quantization.
4. Уровни Ландау [Электронный ресурс]. – Режим доступа :

<http://www.heuristic.su/effects/catalog/est/byId/description/694/index.html>.

5. Уровни Ландау [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B8_%D0%9B%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%83.

6. Напряженность магнитного поля [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://online.mephi.ru/courses/physics/electricity /data/course/7/7.2.html>.

7. Ландау уровни [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://femto.com.ua/articles/part_1/1919.html.

8. Исследование магнитного поля соленоида [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://cito-web.yspu.org./link1/lab/lab_elect/lab_elekt12.pdf.

9. Магнитное поле соленоида [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%BC/02-7.htm.

10. Определение индуктивности соленоида [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://tsput.ru/res/fizika /9/e/lr_e_10.pdf.

11. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология: Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 6. Измерение энергетического уровня Ферми и энергии Ферми при нормальных условиях проведения измерений / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 3. – С. 241–254.

12. Патент України на винахід № 119073. Магнітопольний вимірювальний перетворювач / Кондратов В.Т. Бюл. № 8, 25.04.2019.

13. Энергетический уровень [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%83%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D1%8C.

References

1. Dubrovskij I. M. Novaya teoriya elektronnoho gaza v magnitnom pole i zadachi dlya teorii i eksperimenta [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://ufm.imp.kiev.ua/article/v17/i01/Usp.Fiz.Met.17.053.pdf>.

2. Levitacionnaya plavka [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://www.youtube.com/watch?v=DkpEz7znpnc>.

3. Kvantovanie Landau [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://en.m.wikipedia.org/wiki/Landau_quantization.

4. Urovni Landau [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://www.heuristic.su/effects/catalog/est/byId/description/694/index.html>.

5. Urovni Landau [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B8_%D0%9B%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%83.

6. Napryazhennost magnitnoho polya [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://online.mephi.ru/courses/physics/electricity /data/course/7/7.2.html>.

7. Landau urovni [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://femto.com.ua/articles/part_1/1919.html.

8. Issledovanie magnitnoho polya solenoida [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://cito-web.yspu.org./link1/lab/lab_elect/lab_elekt12.pdf.

9. Magnitnoe pole solenoida [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%BC/02-7.htm.

10. Opredelenie induktivnosti solenoida [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://tsput.ru/res/fizika /9/e/lr_e_10.pdf.

11. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya: Magnitopolovaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 6. Izmerenie energeticheskogo urovnya Fermi i energii Fermi pri normalnyh usloviyah provedeniya izmerenij / V.T. Kondratov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 3. – S. 241–254.

12. Patent Ukrainy na vinahid № 119073. Magnitopolovij vimiryvalnij peretvoryuvach / Kondratov V.T. Byul. № 8, 25.04.2019.

13. Energeticheskij uroven [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%83%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D1%8C.

Рецензія/Peer review : 7.6.2019 р. Надрукована/Printed : 18.7.2019 р.

Стаття рецензована редакційною колегією