

В. И. ПРОФАТИЛОВ (ДИИТ)

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЯКОРЯ РЕЛЕ ПО МАГНИТНОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ РАБОЧЕГО ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

Запропоновано метод визначення положення якоря реле по магнітному опору робочого повітряного зазору. Метод ґрунтується на тому, що значення магнітного опору робочого зазору практично не залежить від струму в обмотці реле і визначається в основному значенням самого зазору. Даний метод дозволяє вирішити комплексну задачу автоматизації вимірювання механічних параметрів електромагнітних реле залізничної автоматики без зняття кожуха відповідно до експлуатаційно-технічних вимог до реле першого класу надійності.

Предложен метод определения положения якоря реле по магнитному сопротивлению рабочего воздушного зазора. Метод основан на том, что значение магнитного сопротивления рабочего зазора практически не зависит от тока в обмотке реле и определяется в основном величиной самого зазора. Данный метод позволяет решить комплексную задачу автоматизации измерения механических параметров электромагнитных реле железнодорожной автоматики без снятия кожуха в соответствии с эксплуатационно-техническими требованиями к реле первого класса надежности.

A method of defining the position of relay anchor according to the magnetic resistance of a working air backlash is offered in the article. This method is based on the fact that the value of magnetic resistance of a working backlash does not virtually depend on the current in the relay winding and is basically determined by the size of the backlash itself. The method allows deciding the complex task of automation of measuring the mechanical parameters of electromagnetic relays in railway automatic systems without removal of casing, in accordance with the operational and technical requirements to the first-class reliability relays.

Введение и постановка задачи

В настоящее время в Украине основные системы железнодорожной автоматики выполнены на базе реле первого класса надежности, с помощью которых обеспечивается безопасность движения поездов. Для обеспечения надежной и безотказной работы реле первого класса надежности проходят трудоемкий процесс регулировки и проверки на заводе-изготовителе. В процессе эксплуатации реле железнодорожной автоматики также подвергаются периодической проверке и регулировке по всему комплексу параметров, так как в процессе длительной эксплуатации параметры реле изменяются.

В соответствии с «Инструкцией по техническому обслуживанию устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ)» все основные работы по ремонту, регулировке и проверке параметров реле сосредоточены на ремонтно-технологических участках (РТУ) СЦБ [1]. При проверке в РТУ реле железнодорожной автоматики измерению подлежат электрические, временные и механические параметры. Наиболее трудоемким процессом является измерение механических параметров реле: высоты антимангнитного штифта, межконтактного зазора в крайних положениях якоря и при пере-

лете контактов, совместного хода контактов, контактного давления, неодновременности замыкания контактов.

В настоящее время измерение механических параметров реле в РТУ осуществляется различного рода приспособлениями, шаблонами, графмометрами, щупами и т. п. Существующая технология проверки механических параметров реле железнодорожной автоматики отличается низкой точностью и высокой субъективностью, из-за большого количества ручных операций. Часть механических параметров, таких как неодновременность замыкания контактов и совместный ход контактов, вообще не измеряются, поскольку в РТУ отсутствуют для этого измерительные средства. Для контроля данных параметров используется очень субъективный способ визуальной оценки, который не измеряет реальное значение параметра, а только фиксирует, соответствует норме или нет измеряемое значение.

Анализ существующей технологии измерения механических параметров реле железнодорожной автоматики показывает, что она морально и технически устарела, а также требует значительных затрат времени. Статистические исследования, проведенные на кафедре «Автоматика, телемеханика и связь» ДИИТа, показа-

ли, что до 10 % реле железнодорожной автоматики выпускаются в эксплуатацию с параметрами, которые не соответствуют нормативным значениям [2]. Таким образом, существующая технология проверки механических параметров реле в РТУ не может обеспечить качественное обслуживание устройств железнодорожной автоматики, в современных условиях при увеличении скорости движения поездов. Для устранения данных недостатков необходимо автоматизировать процесс измерения параметров электромагнитных реле железнодорожной автоматики с использованием современной элементной базы.

Для автоматизированного измерения механических параметров реле необходимо знать положение якоря в любой момент времени. Попытки решения данной задачи осуществлялись и ранее. В работе [3] авторы предлагали способ измерения величины воздушного зазора между якорем и сердечником реле, построенный на базе токовихревого датчика. Недостатком данного способа является то, что применение внешнего датчика позволяло создать только полуавтоматический стенд, так как датчик требовал индивидуальной калибровки и настройки для каждого измеряемого реле. К тому же обработка информации проводилась в аналоговой форме, что снижало точность получаемых результатов. В работе [4] предлагается измерительное устройство, в котором для определения положения якоря используется датчик Холла. Датчик размещается на неподвижном сердечнике и при перемещении якоря с него снимается напряжение, пропорциональное магнитной индукции, а изменение магнитной индукции будет пропорционально скорости движения якоря $d\delta/dt$. Проинтегрировав напряжение, пропорциональное $d\delta/dt$, получают напряжение, пропорциональное координате якоря электромагнитного реле. К недостаткам данного метода можно отнести необходимость снятия кожуха реле для крепления датчика Холла, а также то, что не у всех типов реле есть место на сердечнике для размещения датчика Холла. К тому же крепление датчика на якоре приводит к изменению параметров самого измеряемого реле.

Целью работы является разработка метода определения положения якоря реле по магнитному сопротивлению рабочего воздушного зазора для автоматизации измерения механических параметров реле железнодорожной автоматики типов НМШ и РЭЛ. Метод используется в автоматизированном измерительном комплексе для контроля параметров

реле железнодорожной автоматики, который был разработан на кафедре «Автоматика, телемеханика и связь» ДИИТа.

Описание метода

Метод определения положения якоря по значению магнитного сопротивления воздушного зазора между якорем и сердечником реле основан на том, что значение магнитного сопротивления рабочего зазора практически не зависит от тока в обмотке реле и определяется в основном величиной самого зазора.

Исходными данными для расчета магнитной цепи реле являются:

- зависимость тока в обмотке от времени $i(t)$ при включении реле;
- схема замещения магнитной цепи реле (определяется конструкцией магнитопровода реле);
- форма кривой намагничивания материала магнитопровода (в аналитическом виде);
- значение проводимостей путей магнитного потока по воздуху.

Ток в обмотке реле i и потокосцепление Ψ связаны между собой уравнением электрической цепи обмотки реле:

$$u(t) = i(t)R + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1)$$

где R – активное сопротивление обмотки; Ψ – потокосцепление обмотки реле; i – ток в обмотке реле; u – напряжение источника питания.

Если напряжение источника питания $u(t) = \text{const}$, то потокосцепление равно:

$$\Psi(t) = U(t - t_0) - R \int_{t_0}^t i(t) dt. \quad (2)$$

Из-за наличия потоков рассеяния, величина магнитного потока в сердечнике реле изменяется по длине магнитопровода. Магнитное сопротивление стыка сердечник-ядро в нормальнодействующих реле типа НМШ или РЭЛ можно принять равным нулю, и следовательно, максимальный магнитный поток Φ_0 будет в основании сердечника. Обмотка в нормальнодействующих реле НМШ и РЭЛ распределена равномерно по всей длине сердечника, поэтому потокосцепление на участке сердечника dx будет равно [5]:

$$d\Psi = \Phi_x \frac{w}{l_c} dx, \quad (3)$$

где w – количество витков в обмотке реле; l_c – длина сердечника; Φ_x – магнитный поток в сечении x магнитопровода. Тогда полное число потокоцеплений реле будет равно:

$$\Psi = \frac{w}{l_c} \int_0^{l_c} \Phi(x) dx. \quad (4)$$

Подставим в уравнение (4) вместо $\Phi(x)$ его аналитическое выражение [5]:

$$\Phi(x) = \frac{IW}{l_c R_{ж}} - \left(\frac{IW}{l_c R_{ж}} - \Phi_0 \right) \times \sqrt{\frac{g}{R_{ж}}} ch \cdot x \cdot \sqrt{g \cdot R_{ж}}. \quad (5)$$

На основании уравнений (4) и (5) получим значение магнитного потока в основании сердечника:

$$\Phi_0 = \frac{l_c}{\sqrt{g R_{ж}} sh \cdot l_c} \left(\frac{\Psi}{w} - \frac{IW}{l_c R_{ж}} \right) + \frac{IW}{l_c R_{ж}}, \quad (6)$$

где $R_{ж}$ – сумма магнитных сопротивлений единицы длины (1 м) магнитопровода (сердечника и ярма); g – магнитная проводимость потока рассеяния между сердечником и корпусом на единицу длины (1 м) магнитной цепи.

В реле НМШ и РЭЛ поток утечки замыкается между сердечником цилиндрической формы и параллельно расположенным плоским основанием реле. Удельная проводимость утечки на единицу длины магнитопровода для реле НМШ будет равна [5]:

$$g = \mu_0 \frac{2 \pi}{\ln \frac{h + \sqrt{h^2 + r^2}}{r}}, \quad (7)$$

где h – расстояние между основанием реле и осью сердечника; r – радиус сердечника реле.

Для реле РЭЛ при определении удельной магнитной проводимости утечки необходимо учитывать, что кроме потока утечки между сердечником и ярмом существует еще и поток утечки между сердечниками. С учетом того, что магнитные потоки в сердечниках реле РЭЛ направлены в противоположные стороны удельная проводимость для магнитного потока рассеяния будет равна:

$$g = \mu_0 \left(\frac{2\pi}{\ln \frac{h_1 + \sqrt{h_1^2 + r^2}}{r}} - \frac{\pi}{\ln \frac{h_2 + \sqrt{h_2^2 + 4r^2}}{2r}} \right), \quad (8)$$

где h – расстояние между сердечниками реле; r – радиус сердечников реле.

Магнитное сопротивление стали $R_{ж}$ определяется для среднего магнитного потока в сердечнике по формуле

$$R_{ж} = \frac{w(H_c + H_{яр})}{\Psi}, \quad (9)$$

где H_c – напряженность магнитного поля в сердечнике; $H_{яр}$ – напряженность магнитного поля в ярме реле. Экспериментальные исследования показали, что изменение магнитного сопротивления магнитопровода вдоль сердечника дает незначительную погрешность, поэтому вычисление $R_{ж}$ по среднему магнитному потоку в сердечнике реле дает погрешность не более 2,8...3,2 %.

Для того чтобы определить магнитный поток в любой точке магнитопровода, необходимо решить общее уравнение магнитной цепи, которое определяет закон изменения магнитного потока по длине магнитопровода [5]

$$\frac{d^2 \Phi_x}{dx^2} - \Phi_x R_{ж} g + \theta g = 0, \quad (10)$$

где θ – удельная намагничивающая сила, создаваемая обмоткой реле.

Рабочий магнитный поток в воздушном зазоре между ярком и сердечником Φ_6 можно определить по формуле, которая является аналитическим решением общего уравнения магнитной цепи реле (10):

$$\Phi(\delta) = \frac{IW}{l_c R_{ж}} - \left(\frac{IW}{l_c R_{ж}} - \Phi_0 \right) \times \sqrt{\frac{g}{R_{ж}}} chl_c \sqrt{g R_{ж}}. \quad (11)$$

Недостатком выражения (11) является то, что в нем магнитное сопротивление стали $R_{ж}$ принимается постоянным на всей длине магнитопровода. Но магнитное сопротивление $R_{ж}$ зависит от магнитного потока и, следовательно, также изменяется по длине сердечника. Поэтому для увеличения точности вычисления рабочего магнитного потока, магнитная цепь реле разбивается на участки $dx = 0,01$ мм, и для каждого из них вычисляется магнитное сопротивление $R_{ж}$ в зависимости от значения магнитного потока $\Phi(x)$ на этом участке.

Для реле РЭЛ при определении $R_{ж}$ необходимо учитывать, что магнитный поток проходит по обоим сердечникам.

Общее уравнение магнитной цепи реле (10) является уравнением второго порядка и для решения его численными методами данное уравнение можно представить в виде системы двух дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \frac{dU_{\text{мх}}}{dx} &= -(\theta - \Phi_x R_{ж}), \\ \frac{d\Phi}{dx} &= U_{\text{мх}} g. \end{aligned} \quad (12)$$

Существует обширное семейство численных методов решения дифференциальных уравнений, получивших название методы Рунге-Кутты: метод Эйлера (простой одношаговый метод), метод Хьюна и т. п. Численные методы Рунге-Кутты основаны на замене производных их конечно-разностными отношениями, что позволяет избавиться от такого неудобного для вычислительных систем объекта, как производная, заменив систему дифференциальных уравнений на систему алгебраических уравнений.

Для решения системы дифференциальных уравнений (12) используется двухшаговый метод Хьюна:

$$\begin{aligned} S_1 &= F(x_0, y_0), \quad z = x_0 + S_1 dx, \\ S_2 &= F(x_1, z), \quad y_1 = y_0 + \frac{S_1 + S_2}{2} dx. \end{aligned}$$

Для построения первого приближения S_1 в точке x_1 используется метод Эйлера. Затем в этой точке определяется тангенс угла наклона касательной к графику функции S_2 . Для получения окончательного результата $y_1(x_1)$ производится усреднение тангенсов угла наклона в обеих точках.

Начальными условиями для расчета магнитной цепи реле, при заданной намагничивающей силе θ , являются: $x = 0$; $\Phi(0) = \Phi_0$ (максимальное значение магнитного потока в основании сердечника); $U_{\text{м}}(0) = 0$. Сердечник разбивается по длине на участки $dx = 0,01$ мм (при $l_c = 90$ мм для реле НМШ и $l_c = 80$ мм для реле РЭЛ). Дальнейшее увеличение количества участ-

ков не приводит к повышению точности расчета, а только увеличивает длительность расчетов.

Определив магнитный поток в основании сердечника Φ_0 , рабочий магнитный поток в воздушном зазоре между якорем и сердечником Φ_{δ} и магнитный поток рассеяния Φ_g , можно рассчитать по эквивалентной схеме замещения магнитной цепи реле, представленной на рис. 1, значения магнитных сопротивлений элементов магнитопровода реле: $R_{\text{ст}}$ – магнитное сопротивление сердечника и ярма реле; $R_{я}$ – магнитное сопротивление якоря и основания ярма; $R_{\text{в}}$ – магнитное сопротивление воздушных зазоров магнитной цепи реле; R_g – приведенное магнитное сопротивление путей утечки магнитного потока; R_{δ} – магнитное сопротивление рабочего воздушного зазора, зависящее от положения якоря.

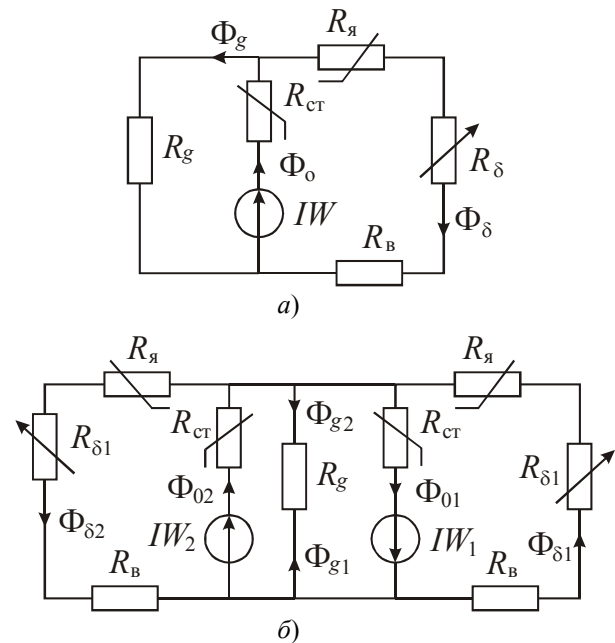


Рис. 1. Схема замещения магнитной цепи реле: а) – реле НМШ; б) – реле РЭЛ

В соответствии со схемой замещения магнитной цепи реле магнитное сопротивление рабочего воздушного зазора будет равно:

$$R_{\delta}(t) = \frac{\left(\frac{i(t)w}{\Phi_{\delta}} - R_{\text{СТ}} \right) R_g}{R_g + R_{\text{СТ}}} - R_{я}. \quad (13)$$

Воздушный зазор между сердечником и якорем у реле НМШ и РЭЛ (рис. 2) представляет собой зазор между торцом цилиндрического полюса и наклоненным под углом плоским якорем. Проводимость воздушного зазора дан-

ного типа можно выразить как произведение проводимости равномерного зазора и поправочного коэффициента k [6]:

$$G = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta} k, \quad (14)$$

где

$$k = 2\rho_1 \left(\rho_1 - \sqrt{\rho_1^2 - 1} \right),$$

$$\rho_1 = \frac{2 R_0}{d \left(1 - \frac{\Delta}{\delta} \right)}.$$

На основании выражения (14) расстояние между полюсом сердечника и якорем по оси сердечника в момент времени t будет равно:

$$\delta(t) = k \frac{\mu_0 R_\delta(t) d^2}{4}. \quad (15)$$

На рис. 3. приведены экспериментальные зависимости значения магнитного сопротивления рабочего воздушного зазора R_δ от по-

ложения якоря δ и расчетные, полученные по данному методу. Сравнительный анализ полученных данных показал, что расхождение экспериментальных и расчетных значений для различных типов реле не превышает 5...8 %.

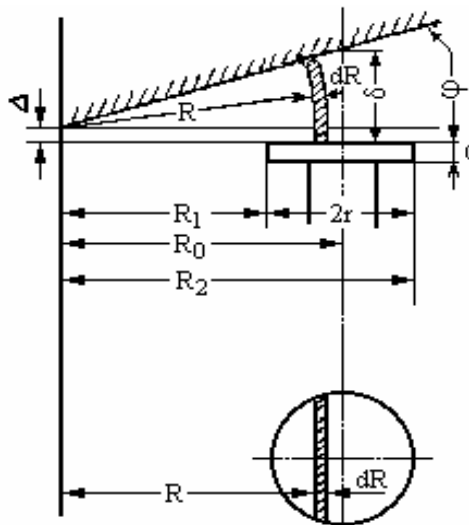


Рис. 2. Воздушный зазор между якорем и сердечником для реле НМШ и РЭЛ

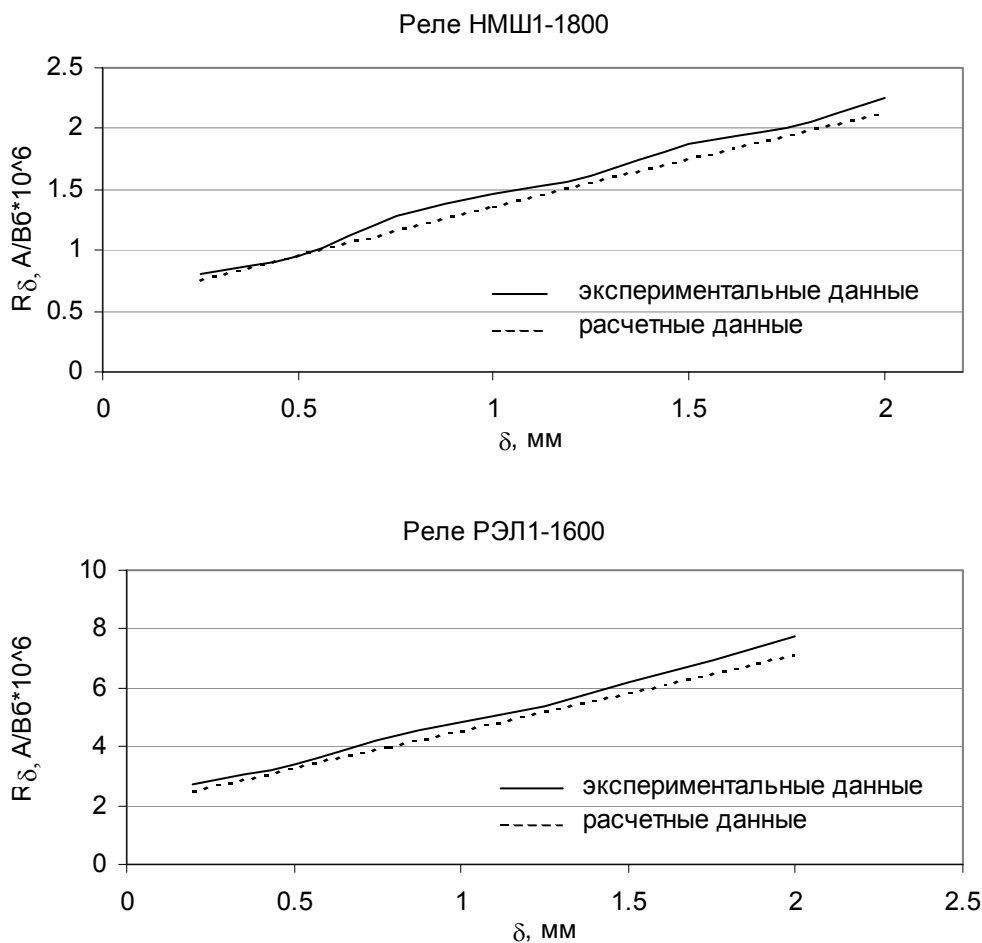


Рис. 3. Зависимость значения магнитного сопротивление воздушного зазора от положения якоря в реле НМШ и РЭЛ

Напряжение, пропорциональное зависимости $i(t)$, снимается с прецизионного резистора R_0 , который включен последовательно с обмоткой реле. Затем зависимость $i(t)$ вводится в персональный компьютер (ПК) типа IBM PC для дальнейшей математической обработки по приведенному выше методу. Одновременно с зависимостью $i(t)$, с помощью логического анализатора на 16 входов, в ПК вводится информация о состоянии всех фронтных и тыловых контактов реле.

Таким образом, данный метод позволяет по форме тока в обмотке во время включения реле определить положения якоря в любой момент времени, путем расчета параметров магнитной цепи реле, т. е. получить зависимость $\delta = f(t)$, где δ – расстояние между полюсом сердечника и якорем по оси сердечника.

Из зависимости $\delta(t)$ можно определить моменты начала движения и останова якоря, а при сопоставлении с моментами размыкания и замыкания контактов можно вычислить такие механические параметры реле, как физический зазор между якорем и сердечником, совместный ход контактов, межконтактный зазор в момент перелета контактов и в крайних положениях якоря, высоту антимагнитного штифта, неодновременность замыкания контактов.

Кроме того, зависимость $\delta(t)$ может использоваться в качестве исходных данных для определения контактного давления и электромагнитной силы притяжения якоря реле.

Выводы

Предлагаемый метод определения положения якоря по значению магнитного сопротивления воздушного зазора между якорем и сердечником реле позволяет решить задачу автоматизации измерения механических параметров электромагнитных реле железнодорожной автоматики типов НМШ и РЭЛ без снятия кожуха в соответствии с эксплуатационно-техническими требованиями к реле первого

класса надежности. Данный метод реализован программно и используется совместно с автоматизированным измерительным комплексом для проверки параметров реле железнодорожной автоматики. Оценка погрешности вычисления механических параметров реле позволяет использовать метод на практике вместо существующей технологии проверки реле.

К достоинствам данного метода измерения механических параметров реле можно отнести увеличение точности и уменьшение субъективности получаемых результатов, а также уменьшение времени на измерение, за счет того, что отпадает необходимость проводить измерения для каждого контакта отдельно и снимать кожух реле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ): ЦШЕОТ/0012: Затв. Гол. упр. зв'язку, енергетики та обчислювальної техніки М-ва транспорту України 05.10.1998. – К., 1998. – 72 с.
2. Стенд для проверки реле СЦБ. Разработка предложений по созданию стенда на базе КТС-ЛИУС-2: Отчет по НИР / ДИИТ. – № 353/3803. – Д., 1983. – 54 с.
3. Разгонов А. П. Полуавтоматический стенд для контроля и измерения параметров реле // Межвузовский сборник научных трудов. Днепропетр. ин. инж. трансп. – Д.: Транспорт. 1985. – С. 11–20.
4. Устройство для снятия динамической электромагнитной характеристики электромагнитных элементов постоянного тока при срабатывании: А.С. 789970 СССР, МКИ G05 B23/02/ Р. А. Агаронянц. – № 2671891/24-07; Заявлено 03.10.78; Оpubл. 23.12.80, Бюл. № 47. – 4 с.
5. Витенберг М. В. Расчет электромагнитных реле. – М.: Энергия, 1975. – 416 с.
6. Гордон А. В. Электромагниты постоянного тока / А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.

Поступила в редколлегию 11.12.04.