

УДК 621.642.6

ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ УРОВНЯ КРИОГЕННОЙ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

М.А. Колосов, В.Ю. Емельянов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: 72072@mail.ru

Создан уровнемер криогенной жидкости, в котором применен терморезистивный эффект в композитных высокотемпературных сверхпроводниках. Использование тонких высокотемпературных сверхпроводников обеспечивает небольшие теплопритоки к криоагенту, потенциально позволяет получить хорошие инерционные, метрологические и экономические (плата за одно измерение) показатели. Рассмотрены результаты моделирования теплообмена высокотемпературных сверхпроводников с жидким азотом, приведены экспериментальные рабочие характеристики высокотемпературных сверхпроводников. Разработан и создан вторичный прибор — измеритель уровня жидкого азота. Проведена его апробация на лабораторном сосуде Дьюара с жидким азотом.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, измерение уровня криогенных жидкостей, терморезистивный измеритель уровня, вторичный прибор-измеритель уровня, уровнемер, ВТСП-датчик, сосуд Дьюара, жидкий азот.

THERMORESISTIVE LEVEL GAGE OF CRYOGENIC LIQUID BASED ON HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR

M.A. Kolosov, V.Yu. Emel'yanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: 72072@mail.ru

The article discusses the creation of cryogenic liquid level gage where the thermoresistive effect in composite high-temperature superconductors is applied. The usage of thin high-temperature superconductors enables small heat penetration to the cryoagent and potentially allows to obtain good inertial, metrological and economic (a payment for one measurement) indicators. Results of heat exchange modeling of high-temperature superconductors with liquid nitrogen are considered. Experimental performance data of high-temperature superconductors are given. The secondary gage of liquid nitrogen level is developed, created and approbated by means of a Dewar flask with liquid nitrogen.

Keywords: high-temperature superconductor, level measurement of cryogenic liquid, thermoresistive level gage, secondary level gage, level gage, high-temperature superconductivity HTSC - gage, Dewar flask, liquid nitrogen.

На всех этапах развития криогенной техники в целом и ее направлений, связанных с получением, транспортировкой и хранением сжиженных газов, в частности, вопросы диагностики состояния, контроля и измерения параметров газожидкостных потоков криогенных

сред являются насущными, разработкам указанных средств измерения уделяется большое внимание. К таковым устройствам относят и устройства контроля уровня жидкости в криогенных резервуарах.

В настоящее время, когда прошло более 25 лет после открытия купратных сверхпроводников, прогресс в технологиях привел к тому, что ряд известных мировых компаний предлагает длинномерные изделия из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), главным образом на базе материалов YBCO(123), DyBCO(123), BSCCO(2212) и BSCCO(2223). Использование таких ВТСП в качестве чувствительного элемента устройства контроля уровня жидкости (уровнемера) и позволило создать современный прибор.

В металлургии, энергетике, машиностроении, в пищевой промышленности и в других отраслях широко используется стационарное и транспортное емкостное оборудование, эксплуатация которого требует обеспечения безопасности при работе самого оборудования и обслуживающего персонала.

Особенно остро вопросы безопасной эксплуатации и эффективности стоят при использовании емкостного оборудования (сосуды Дьюара) в технологических процессах криогенной техники. Поскольку в этой области вопросы безопасности и надежности увязаны со спецификой физических свойств самих жидкостей, часто датчики в сосудах Дьюара выполняют функции диагностики параметров состояния криогенных сред и контроля уровня жидкости одновременно.

Анализ тяжелых аварий (взрывов транспортных цистерн, баллонов со сжиженными газами и др.) показывает, что основной причиной является переполнение сосуда сверх нормы, которое происходит при отсутствии контроля заполнения или при выходе из строя датчиков уровня. Поэтому законодательно предельный уровень заполнения криогенных емкостей ограничивается 80 % номинальной емкости.

Таким образом, надежность контроля уровня криогенной жидкости тесно связана с безопасностью технологических процессов.

Отечественным приборостроением выпускается около 50 типов датчиков, которые обеспечивают измерение, сигнализацию и регулирование уровня криогенных сред, имеющих различные теплофизические свойства при давлениях до 50 МПа и температурах от 0 до 120 К, а также позволяют контролировать уровни до 20 м. Современные устройства хранения криогенных жидкостей ограничивают диапазон рабочих давлений значением до 20 МПа при одновременной точности контроля находящихся в них сред не ниже 5 мм. Датчики, имеющиеся в настоящее время, работоспособны при давлениях до 5 МПа и их точность не превышает 10 мм.

Анализ разных методов и устройств для измерения уровня показал, что в широком диапазоне рабочих условий по точности измерений, т.е.

по своей основной эксплуатационной характеристике, они не удовлетворяют требованиям криогенной техники. Поэтому актуальна задача повышения точности датчиков уровня в широком диапазоне рабочих давлений, характерных для криогенного емкостного оборудования.

В основе работы датчиков уровня лежат несколько различных физических эффектов и с учетом конкретных условий работы и особенностей контролируемой среды применяются первичные датчики различных типов, имеющие наибольшую эффективность при конкретных условиях применения. По принципу действия и базовому физическому эффекту датчики уровня криогенной жидкости делятся на следующие типы: механические и поплавковые, гидростатические, кондуктометрические, акустические и волновые, радиоактивные, емкостные, терморезистивные и термоэлектрические.

В настоящей работе рассматриваются терморезистивные датчики уровня, которые характеризуются отсутствием подвижных механических частей и компактностью, возможностью работы с постоянным током и, как следствие, отсутствием реактивной составляющей сопротивления, что обуславливает их высокую надежность и хорошие термометрические свойства.

В качестве дискретных датчиков в уровнемерах чаще всего применяют термисторы или угольные резисторы, которые выполняют роль сигнализаторов и располагаются над поверхностью раздела фаз, их точность измерения может составлять до $\pm 0,5$ мм. В основном термисторы дают локальную информацию о фазовом состоянии измеряемой среды, т.е. являются детекторами.

Вопросы теплового расчета резисторов изложены в работе [1]. Расчет такого датчика сводится к расчету температурного поля и теплового потока по резистору при протекании через него тока и при переменных условиях теплообмена резистора со средой, которые зависят от уровня заполнения сосуда. В основу теплового расчета положены классические уравнения теплопередачи.

Следующим этапом совершенствования терморезистивного метода измерения уровня криогенных жидкостей стало использование для контроля протяженных проводников (рис. 1).

Принцип работы распределенных (длинномерных) терморезистивных датчиков также основан на зависимости электрического сопротивления материала их чувствительного элемента (датчика) от уровня контакта с жидкостью, т.е. от температурного поля в длинномерном проводнике, вертикально размещенного в сосуде. Температурное поле, в свою очередь, зависит от коэффициента теплоотдачи поверхности датчика к жидкости или пару.

На рис. 1 показана схема длинномерного терморезистивного датчика уровня. В сосуде с жидкостью размещен проводник высотой H ,

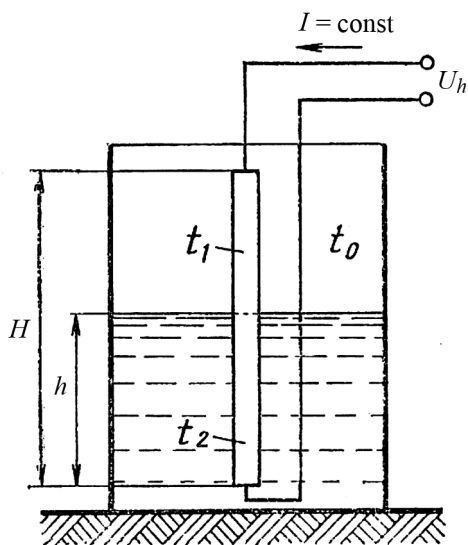


Рис. 1. Схема длинномерного терморезистивного датчика уровня жидкости

ных датчиков нового типа для измерения уровня криогенных жидкостей на их основе. При использовании в качестве чувствительного проводника ВТСП его нижний участок при температуре ниже критической (T_c) будет иметь нулевое сопротивление, а суммарное сопротивление будет определяться только участком проводника ($H-h$), находящимся в паре.

В качестве чувствительного элемента предложенного терморезистивного ВТСП-уровнемера используются длинномерные композитные проводники с ВТСП-фазой. На рис. 2 показаны сечения таких сверхпроводящих композитных проводников. Тело проводника (матрица) составляет, в основном, чистое электротехническое серебро, в которое внедрены тонкие нити сверхпроводника (ВТСП-фазы): $\text{Bi}_1\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212) или $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ (Bi2223). Тип выбранного ВТСП материала зависит от температуры кипения диагностируемой жидкости при условиях хранения.



Рис. 2. Композитные высокотемпературные сверхпроводники

который нагревается постоянным током I . Нижний участок проводника на высоте h охлаждается жидкостью и имеет температуру t_2 , а верхний участок охлаждается парами и имеет более высокую температуру t_1 . Пропорционально температуре меняется удельное сопротивление проводника, и поэтому его интегральное сопротивление и падение напряжения U_h изменяются пропорционально уровню жидкости в сосуде.

В последнее время в связи с прогрессом в производстве ВТСП появились предпосылки для создания простых и удобных датчиков нового типа для измерения уровня криогенных жидкостей на их основе.

Для изучения факторов, влияющих на работу ВТСП уровнемера, была создана физико-математическая модель.

Физико-математическая модель работы ВТСП-датчика включала в себя уравнение нестационарной теплопроводности в теле датчика с учетом внутренних омических тепловыделений и теплообмена на поверхности раздельно с жидкой и паровой фазами криоагента. В модели учитывалось, что внутренние тепловыделения в датчике генерируются в металле матрицы проводника только при ВТСП, находящемся в нормальном состоянии.

Модель теплопроводности для длинномерного терморезистивного датчика в общем виде записывается в следующем виде:

$$\bar{\rho} \bar{c}(T) \frac{\partial T(\tau, x_i)}{\partial \tau} = \nabla (\bar{\lambda}(T) \nabla T(\tau, x_i)) + q_\nu(T);$$

$$q_\nu(T) = \begin{cases} 0 & \text{при } T(\tau, x_i) \leq T_c; \\ \frac{I^2 \delta(T)}{S^2} & \text{при } T(\tau, x_i) > T_c, \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{\rho}$ — средняя плотность материала датчика; $\bar{c}(T)$ — средняя теплоемкость материала датчика; $\bar{\lambda}(T)$ — средняя теплопроводность материала; $q_\nu(T)$ — объемная плотность тепловыделений; $\delta(T)$ — удельное сопротивление материала матрицы ВТСП.

Значения $\bar{c}(T)$, $\bar{\lambda}(T)$, $q_\nu(T)$ определялись в зависимости от температуры текущего сечения ВТСП-датчика.

Теплообмен на границе проводника с криоагентом описывается граничными условиями 3-го рода:

$$\bar{n} \cdot \lambda(T) \nabla T(\tau, x_i) = \alpha(T_{\text{ж}} - T_{\text{п}}), \quad (2)$$

где α — локальный коэффициент теплоотдачи на поверхности, температура которой $T_{\text{п}}$; $T_{\text{ж}}$ — локальная температура криоагента на этой же поверхности; \bar{n} — единичный вектор.

Модель также дополнялась уравнениями для расчета термодинамических свойств материала датчика. Проводник рассматривался как композитный, состоящий из матрицы — серебра или сплава серебра с оловом и ВТСП-материала. Высокотемпературный сверхпроводник равномерно распределен в центральной области провода равномерно в виде нитей микронных размеров керамики Bi2212 или Bi2223 . Поэтому эквивалентная теплопроводность и теплоемкость вычисляется по следующим зависимостям:

$$\bar{\lambda} = \lambda_{\text{сер}}(1 - k_{\text{ВТСП}}) + \lambda_{\text{ВТСП}} k_{\text{ВТСП}};$$

$$\bar{c} = C_{\text{сер}} \frac{S_{\text{сер}}}{S} (1 - k_{\text{ВТСП}}) + C_{\text{ВТСП}} \frac{S_{\text{ВТСП}}}{S} k_{\text{ВТСП}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{ВТСП}}$ — коэффициент заполнения (доля сверхпроводника в поперечном сечении нити). Авторы исследовали проводники с $k_{\text{ВТСП}}$ от 0,3 до 0,7 (таблица); \bar{S} — среднemasсовая плотность проводника.

Параметры исследуемых ВТСП-проводников

Номер образ-ца	$k_{\text{ВТСП}}$	Конфигурация ВТСП-проводника	Число жил	Диаметр сечения, мм	Материал ВТСП/металл. оболочки	$I_{\text{кр}} (77 \text{ К}), \text{ А}$	$T_{\text{кр}}, \text{ К}$
1	0,7	U-образный	1	0,4	Bi2223/Ag	0,8... 0,95	108
2	0,4		61		Bi2223/Ag	0,74... 0,85	108
3	0,4		61		Bi2223/Ag-Sn	0,5	108
4	0,6		1		Bi2223/Ag-Sn	0,5	108
5*	0,3		Линейный		19	Bi212/Ag	

Примечание: * – выпускается серийно.

Термическое состояние материала проводника, рассчитываемое по этой модели, определяет электрическое сопротивление материала ВТСП-матрицы. Поэтому модель дополнялась выражением для определения напряжения, снимаемого с концов длинномерного ВТСП-проводника:

$$U(x) = I \int_0^x \frac{\delta(T(\tau, x_i))}{S} dx, \quad (4)$$

где S – площадь электропроводной части сечения стержня; $\delta(T)$ – зависящее от температуры удельное сопротивление ВТСП-матрицы.

Предварительное исследование размерности задачи теплопроводности показало, что одномерная модель с распределением температуры по длине проводника достаточна для исследования работы ВТСП-датчика. Теплоотдача на поверхности проводника хорошо описывается сосредоточенными моделями конвективного теплообмена на вертикальной стенке отдельно с жидкой и паровой фазами криоагента. Таким образом, сформированная физико-математическая модель рассматривалась в одномерной постановке, при известных коэффициентах теплоотдачи отдельно для газовой и жидкостной областей. Модель решалась численно, с использованием метода контрольного объема [2, 3].

На рис. 3–5 приведены некоторые результаты решения дифференциального уравнения (1) с граничными условиями (2) и свойствами материала (3). Исследовались U-образные ВТСП-проводники, верхним концом как сопрягающиеся с окружающей средой, так и изолированные от нее.

Использование U-образной конструкции ВТСП-датчика позволяет исключить влияние на результат измерения возникающей на концах термо-ЭДС и удвоить напряжение.

Из рис. 4 следует, что контакт датчика с окружающей средой сдвигает линии перехода вправо, уменьшая интегральное падение напряжения на концах.

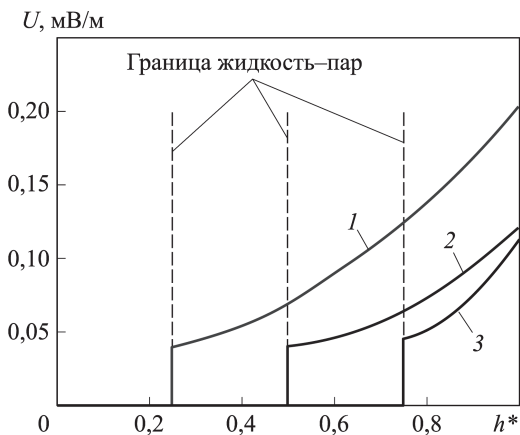


Рис. 3. Удельное падение напряжения при разных уровнях заливки (U -образный, изолированный от ОС ВТСП-проводник):
 1 – $0,25H_{\max}$; 2 – $0,5H_{\max}$; 3 – $0,75H_{\max}$

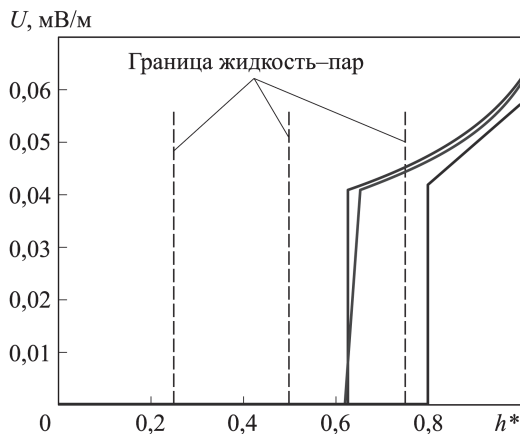


Рис. 4. Удельное падение напряжения при разных уровнях заливки (U -образный, контактирующий с ОС; 1, 2 и 3 – см. рис. 3)

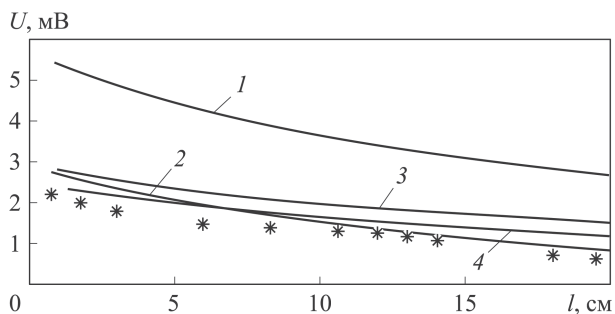


Рис. 5. Рабочие $U = f(l)$ характеристики U -образных ВТСП-проводников, контактирующих с окружающей средой (Bi2223, $I = 100$ мА, $t_{oc} = +25$ °С):
 кривые 1–4 – образцы № 1–№ 4 соответственно; * – моделирование

Для вторичного прибора основной рабочей характеристикой уровнемера является вольт-линейная (статическая) характеристика, которая позволяет рассчитать диапазон входного напряжения уси-

лителя постоянного тока (УПТ). На рис. 5 изображены снятые на стенде экспериментальные характеристики четырех образцов ВТСП-проводников и ВТСП-датчиков (см. таблицу). Крестиками на рис. 5 отмечены данные, рассчитанные по соотношению (4).

Статическая вольт-линейная характеристика $U = f(h)$ является его основной тарифовочной кривой и во многом определяет точность и метрологические качества всего прибора — измерителя уровня. Она же используется и при исследовании переходных характеристик датчика, и эта характеристика удобна для сравнения экспериментальных и расчетных результатов.

Полученные статические вольт-линейные характеристики ВТСП-проводников впоследствии позволили перейти к проектированию и созданию прибора — измерителя уровня криогенной жидкости на их основе.

На рис. 6 изображена функциональная блок-схема измерителя уровня криогенной жидкости на основе ВТСП. Устройство включает в себя источник тока, который вырабатывает постоянный ток требуемого значения для нагрева (перевода в нормальное состояние) датчика и измерения напряжения считывания. Измеренный ток в течение интервала времени τ'_1 протекает по датчику $R(l)$. Полученное напряжение усиливается и поступает на вход устройства регистрации. Отсчет происходит через интервалы времени τ_1 от начала протекания тока по датчику. По стробу импульса длительностью $\tau = \tau'_1 - \tau_1$ происходит дискретизация (представление в цифровом виде) постоянного напряжения, снимаемого с датчика.

Преобразователь напряжение/код — 8-разрядный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) последовательного приближения AD7819 преобразует напряжение, соответствующее уровню криоагента в прямой двоичный код.

Устройство визуализации преобразует двоичный код в удобный для пользователя вид (светодиодная или цифровая шкала прибора т.д.).

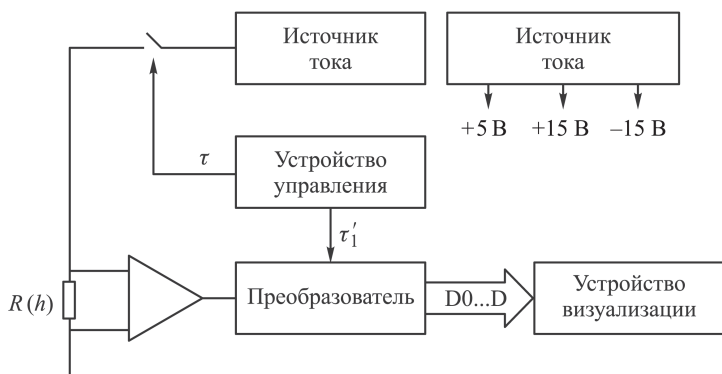


Рис. 6. Функциональная схема измерителя уровня криогенной жидкости

Блок питания преобразует первичное напряжение электросети (220 В, 50 Гц) в требуемые постоянные напряжения для питания описанных узлов, также формирует постоянный ток измерения.

Для опытного прибора был выбран индикатор — светодиодная шкала на основе унифицированной микросхемы преобразователя двоичного кода в код управления светодиодной шкалой КМ155ИД11 (DD2... DD6) [4]. Для увеличения шкалы индуцирования уровней до 32 использовался дополнительный дешифратор К155ИД4 [5].

Принципиальная схема УПТ вторичного прибора приведена на рис. 7.

Постоянное напряжение значением 0,5... 2 мВ, снимаемое с ВТСП-датчика ($R_{дат}$), усиливается прецизионным с малым напряжением смещения нуля ОУ К140УД13 (DA1) МДМ типа. Принцип его работы основан на модуляции снимаемого напряжения внутренними колебаниями ОУ с последующим детектированием (синхронное детектирование).

Поскольку необходимый коэффициент усиления системы обеспечивается за счет применения только одного ОУ, то в цепь демодуляции включен дополнительный малощумящий ОУ (DA2) с внешней регулировкой коэффициента усиления до требуемого значения. Смодулированный сигнал детектируется, фильтруется интегрирующей RC-цепью и подается на вход АЦП.

Аналоговый сигнал подвергается дискретизации по уровню путем сравнения с опорным. Опорный сигнал формируется с помощью источника опорного напряжения REF 193. Формирование цифровых отсчетов измеренного значения происходит с периодичностью поступ-

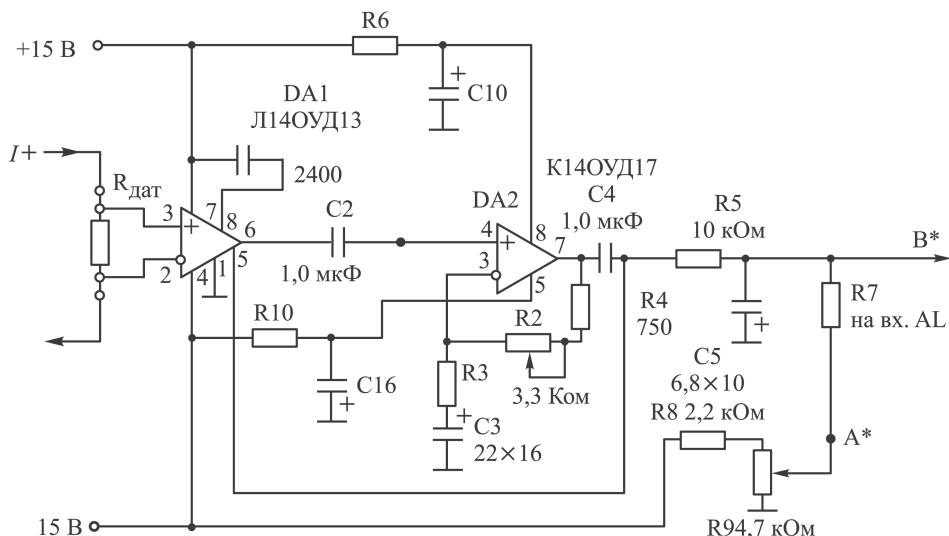


Рис. 7. Фрагмент схемы УПТ ВТСП-уровнемера

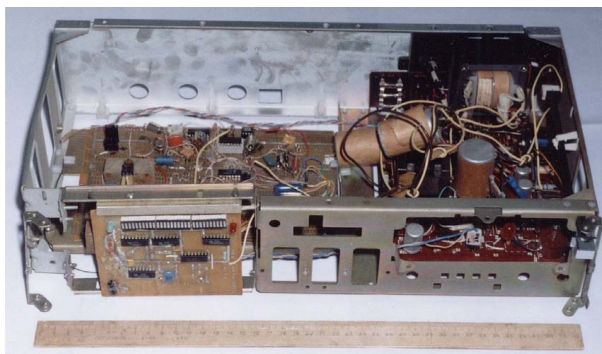


Рис. 8. Экспериментальный прибор

ления тактовых импульсов с выхода мультивибратора выполненного на базе микросхемы КР1006ВИ1 [6].

Общий коэффициент усиления каскадов (до АЦП) составил 190 и дискретность АЦП при опорном напряжении 3 В составила 10 мВ. Поскольку коэффициент усиления каскада на ИМС ОУ К140УД13 (DA1) не более 20, то применили дополнительный каскад на ОУ с более высоким коэффициентом усиления и низким уровнем собственных шумов (< 63 мкВ): К140УД17.

Расчет и подбор элементов схемы блока питания был выполнен по методическим указаниям [5].

В экспериментальном приборе (рис. 8) реализована 32-уровневая светодиодная шкала измерения объема криогенной жидкости. Полученная после настройки прибора характеристика отображения уровня жидкого азота светодиодной шкалой приведена на рис. 9.

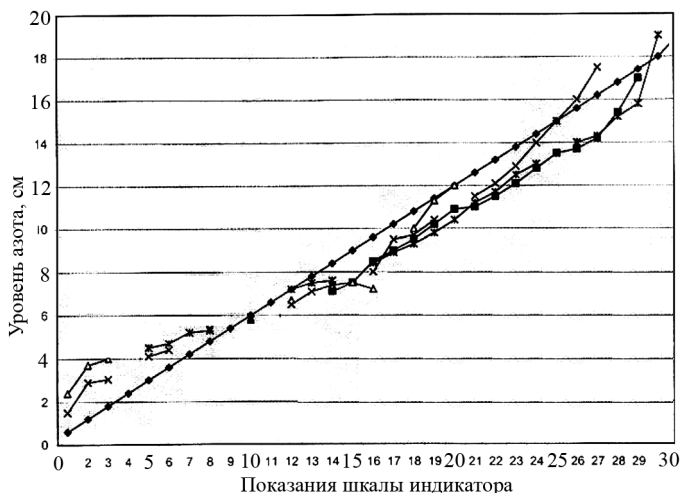


Рис. 9. Экспериментально снятая характеристика ВТСП-уровнемера (образец № 1):

● — идеальная характеристика; ■ — эксперимент № 1; △ — № 2; × — № 3; * — № 4

При построении характеристики проводилось несколько измерений в стационарном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дульнев Г.Н. Теплообмен в радиоэлектронных устройствах. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. 288 с.
2. Емельянов В.Ю., Колосов М.А. Математическое моделирование проволочного ВТСП-датчика уровня криожидкостей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 4. С. 15–18.
3. Архаров И.А., Емельянов В.Ю., Навасардян Е.С. Моделирование и исследование теплообмена ВТСП-проводников в среде жидкого азота. Оценка рабочих характеристик для создания уровнемера криогенной жидкости // IRR – International Conference Cryogenics. Bratislava, 2010.
4. Неведов А.В., Аксенов А.И. Элементы схем бытовой радиоаппаратуры. Микросхемы. Часть 1: Справочник. М.: Радио и связь, 1993. 240 с.
5. Воронов А.В., Казанчев Г.О. Расчет цепей питания многокаскадного усилителя. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1984.
6. Аксененко А.Г. Применение прецизионных аналоговых микросхем. М.: Радио и связь, 1985. 256 с.

REFERENCES

- [1] Dul'nev G.N. Teploobmen v radioelektronnykh ustroystvakh [Heat transfer in radioelectronic device]. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963. 288 p.
- [2] Emel'yanov V.Yu., Kolosov M.A. Mathematic simulation of wire high-temperature superconductivity HTSC – gage of cryoliquid level. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and petroleum engineering], 2008, no. 4, pp. 15–18 (in Russ.).
- [3] Arkharov I.A., Emel'yanov V.Yu., Navasardyan E.S. Simulation and study of heat transfer for high-temperature superconductivity HTSC – conductors in the environment of liquid nitrogen. Performance evaluation for creating cryogenic liquid level gage. *Proc. of 11th IIR – Int. Conf. "Cryogenics"*. Bratislava, Slovakia, 2010.
- [4] Nefedov A.V., Aksenov A.I. Elementy skhem bytovoy radioapparatury. Mikroskhemy. Ch. 1. Spravochnik [Circuits elements of domestic radio equipment. Microcircuitry. Pt. 1. Handbook] Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993. 240 p.
- [5] Voronov A.V., Kazanchev G.O. Raschet tsepey pitaniya mnogokaskadnogo usilitelya [Calculation of a power-supply circuit for multistage amplifier]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 1984.
- [6] Aleksenko A.G. Primenenie pretsizionnykh analogovykh mikroskhem [The use of precision analog circuits]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 256 p.

Статья поступила в редакцию 06.10.2014

Емельянов Василий Юрьевич — инженер УПЦ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 35 научных работ и 7 патентов РФ в области использования сверхпроводимости в системах сотовой связи и хранения криогенных жидкостей, а также ресурсо- и природосбережения при хранении и транспортировке жидких углеводородов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Emelianov V.Yu. — engineer of the Training and Production Center of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 35 publications and of 7 patents of Russian Federation in the field of resources and nature conservation during storage and transportation of liquid hydrocarbon.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Колосов Михаил Анатольевич — канд. техн. наук, доцент кафедры “Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения” МГТУ им. Н.Э. Баумана, чл.-корр. Международной академии холода. Автор более 75 научных работ и трех патентов РФ в области холодильной и криогенной техники. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Kolosov M.A. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Refrigeration and Cryogenic Engineering, Conditioning and Life Support Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University, corresponding member of the International Academy of Refrigeration. Author of more than 75 publications and of 3 patents of Russian Federation in the field of refrigeration and cryogenic engineering.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.