

УДК 621.642.6

Ю.М. Симоненко¹, В.Ю. Емельянов²

¹ Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039

² Московський державний технічний інститут ім. М.Е. Баумана, вул. 2-га Бауманська, 5, Москва, Росія, 105005

ПРОТОТИП ВТОРИННОГО ПРИБАДУ ВИМІРЮВАЧА РІВНЯ КРІОГЕННИХ РІДИН НА ОСНОВІ МЕТАЛОКСИДНИХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ НАДПРОВІДНИКІВ

Метою роботи було створення рівнеміра кріогенної рідини, який використовує терморезистивний ефект в композитних високотемпературних надпровідниках (ВТНП). Використання тонких ВТНП забезпечує невеликі теплопритоки до кріоагента, потенційно дозволяє отримати хороші інерційні, метрологічні та економічні (плата за один вимір) показники. В роботі розглянуті результати моделювання теплообміну ВТСП провідника з рідким азотом, наводяться експериментальні робочі характеристики ВТНП провідників. На завершення був розроблений і створений вторинний прилад-вимірник рівня рідкого азоту. Проведена його апробація на лабораторній посудині Дюара, яка зберігає рідкий азот.

Ключові слова: високотемпературний надпровідник, вимірювання рівня кріогенних рідин, терморезистивний вимірник рівня, вторинний прилад-вимірник рівня, рівнемір, ВТСП датчик, посудина Дюара, рідкий азот.

Ю.М. Симоненко¹, В.Ю. Емельянов²

¹ Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, 65039

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, 5, Москва, Россия, 105005

ПРОТОТИП ВТОРИННОГО ПРИБОРА ИЗМЕРИТЕЛЯ УРОВНЯ КРИОГЕННОЙ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОКСИДНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Целью работы было создание уровнемера кріогенной жидкости, использующего терморезистивный эффект в композитных високотемпературных сверхпроводниках (ВТСП). Использование тонких ВТСП обеспечивает небольшие теплопритоки к кріоагенту, потенциально позволяют получить хорошие инерционные, метрологические и экономические (плата за одно измерение) показатели. В работе рассмотрены результаты моделирования теплообмена ВТСП проводника с жидким азотом, приводятся экспериментальные рабочие характеристики ВТСП проводников. В завершении был разработан и создан вторичный прибор-измеритель уровня жидкого азота. Проведена его апробация на лабораторном сосуде Дюара, хранящего жидкий азот.

Ключевые слова: високотемпературный сверхпроводник, измерение уровня кріогенных жидкостей, терморезистивный измеритель уровня, вторичный прибор-измеритель уровня, уровнемер, ВТСП датчик, сосуд Дюара, жидкий азот.

DOI: 10.15673/0453-8307.1/2015.36781



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

I. ВВЕДЕНИЕ

На всех этапах развития кріогенной техники в целом и её направлений, связанных с получением, транспортировкой и хранением сжиженных газов в частности, вопросы диагностики состояния, контроля и измерения параметров газожидкостных потоков кріогенных сред являются насущными и разработкам средств измерения уделяется большое внимание. К таковым устройствам относят и устройства контроля уровня жидкости в кріогенных 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 ВТСП, главным образом на базе материалов YBCO(123), DyBCO(123), BSCCO(2212) и BSCCO(2223). Использование такого високотемпературного сверхпроводника (ВТСП) в качестве чувствительного элемента устройства контроля уровня жидкости (уровнемера) и позволило создать современный прибор.

II. АКТУАЛЬНОСТЬ

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 Дюара) в тех. процессах криогенной техники. Поскольку в этой области вопросы безопасности и надежности увязаны со спецификой физических свойств самих жидкостей. Часто датчики в сосудах Дюара выполняют функции диагностики параметров состояния криогенных сред и контроля уровня жидкости одновременно.

Анализ тяжелых аварий (взрыв транспортных цистерн, баллонов со сжиженными газами и т.д.) показывает, что основной причиной их являлось 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 величиной 80% от номинальной емкости.

Таким образом, надежность контроля уровня криогенной жидкости тесно увязана 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 при температурах от 0 до 120 К, позволяют контролировать уровни до 20 метров. Современные устройства хранения криогенных жидкостей (сосуды Дюара) ограничивают диапазон рабочих давлений величиной до 20 МПа при одновременной точности контроля находящихся в них сред не ниже 5 мм, а имеющиеся в настоящее время датчики работоспособны при давлениях до 5 МПа и их точность не превышает 10 мм.

Анализ различных 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 различного типа, имеющие наибольшую эффективность при конкретных условиях применения. По принципу действия и базовому физическому эффекту датчики уровня криогенной жид-

кости 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 [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 (рисунок 1).

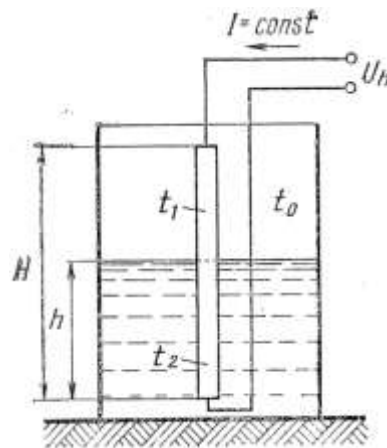


Рисунок 1 – Схема длинномерного терморезистивного датчика уровня жидкости.

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 коэффициен-

та теплоотдачи поверхности датчика к жидкости или пару.

На рисунке 1 показана схема длинномерного терморезистивного датчика уровня. В сосуде с жидкостью размещен проводник высотой H , который нагревается током постоянной величины 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.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВТСП ПРОВОДНИКАХ

В последнее время, в связи с прогрессом в производстве высокотемпературных сверхпроводников появились предпосылки для создания простых и удобных датчиков нового типа для измере-

ния 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 и суммарное сопротивление будет определяться только участком проводника ($H-h$), находящегося в парах.

В качестве чувствительного элемента предложенного терморезистивного ВТСП-уровнемера используются длинномерные композитные проводники с ВТСП фазой. На фотографии (рисунок 2) представлены сечения таких сверхпроводящих композитных проводников.

Тело проводника (матрица) составляет, в основном, чистое электротехническое серебро, в которое внедрены тонкие нити сверхпроводника (ВТСП-фазы): $Bi_1Sr_2Ca_1O_{8+\delta}$ (Bi2212) или $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ (Bi2223).

Тип выбранного ВТСП материала зависит от температуры кипения диагностируемой жидкости при условиях хранения.

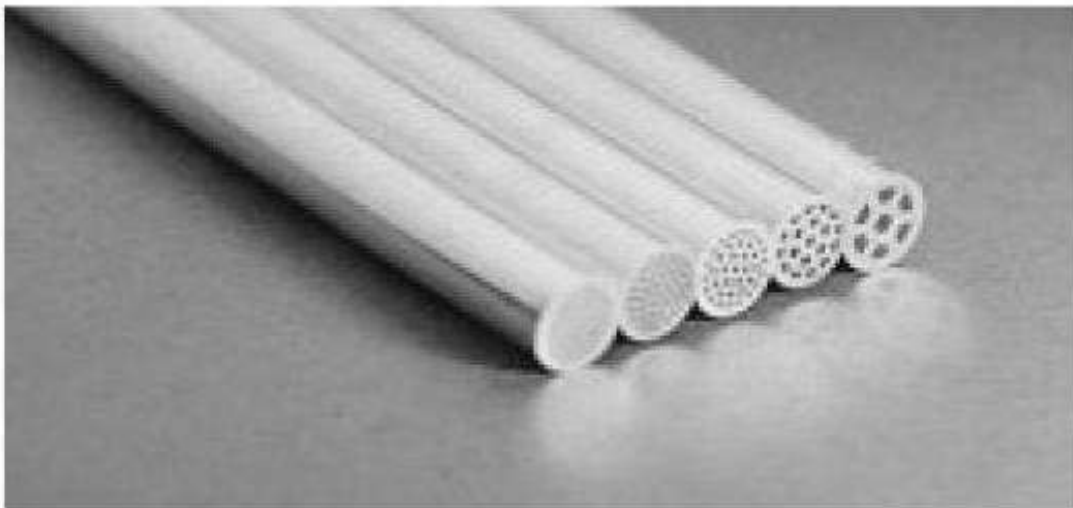


Рисунок 2 – Фото композитных высокотемпературных сверхпроводников.

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

Физико-математическая модель работы ВТСП проводника.

Физико-математическая модель ВТСП датчика включала уравнение нестационарной теплопроводности в теле датчика с учётом внутренних омических тепловыделений и теплообмена на поверхности раздельно с жидкой и паровой фазой криоагента. В данной 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:

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

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

где $\bar{\rho}$ – средняя плотность материала датчика, [кг/м³]; $\bar{c}(T)$ – средняя теплоемкость материала датчика, [кДж/(кг·К)]; $\bar{\lambda}(T)$ – средняя теплопроводность материала, [Вт/(м·К)]; $q_v(T)$ – объемная плотность тепловыделений, [Вт/м³]; $d(T)$ – удельное сопротивление матрицы ВТСП, [Ом/м]

Величины $\bar{c}(T)$, $\bar{\lambda}(T)$, $q_v(T)$ определялись в зависимости от температуры текущего сечения ВТСП датчика.

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

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

где α – локальный коэффициент теплоотдачи на поверхности, температура которой T_{II} ; $T_{жс}$ – 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.

ВТСП равномерно распределен в центральной области провода равномерно в виде нитей микронных размеров керамики *Bi-2212* или *Bi 2223*. Поэтому эквивалентная теплопроводность ($\lambda_{экс}$) и теплоемкость ($C_{экс}$) вычисляются по следующим зависимостям:

$$\lambda_{экс} = \lambda_{сер} \cdot (1 - k_{ВТСП}) + \lambda_{ВТСП} \cdot k_{ВТСП}, \quad (3)$$

$$C_{экс} = C_{сер} \cdot \frac{\rho_{сер}}{\rho} (1 - k_{ВТСП}) + C_{ВТСП} \cdot \frac{\rho_{ВТСП}}{\rho} k_{ВТСП},$$

где $k_{ВТСП}$ – коэффициент заполнения (доля сверхпроводника в поперечном сечении нити). Нами исследовался проводник с $k_{ВТСП}$ от 0.3 до 0.7 (таблица 1); C , λ , $\rho_{сер}$, $\rho_{ВТСП}$ – удельные теплоемкость и теплопроводность серебра и ВТСП, соответственно.

Таблица 1 – Параметры исследуемых ВТСП проводников

№ об-разца	$k_{ВТСП}$	Конфигурация ВТСП проводника	Число жил	сечение, мм	материал ВТСП/металл. оболочки	Икр. (77К), А	Ткр, К
1	0.7	U-образный	1	Ø=0.4	<i>Bi-2223/Ag</i>	0.8...0.95	108
2	0.4		61		<i>Bi-2223/Ag</i>	0.74...0.85	108
3	0.4		61		<i>Bi-2223/Ag-Sn</i>	0.5	108
4	0.6		1		<i>Bi-2223/Ag-Sn</i>	0.5	108
5*	0.3	линейный	19		<i>Bi-2212/Ag</i>	16	83

*- выпускается серийно

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

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

где S – электропроводная часть сечения стержня; $\delta(T)$ – зависящее от температуры удельное сопротивление матрицы ВТСП.

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 фазой криоагента. Таким образом, сформированная физико-математическая модель нами рассматривалась в одномерной постановке, при известных коэффициентах теплоотдачи отдельно для газовой и жидкостной области. Модель реша-

лась численно, с использованием метода контрольного объема [2, 6].

На рисунках 3–5 представлены 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 неё.

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

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

Для вторичного прибора основной рабочей характеристикой уровнемера является вольт-линейная (статическая), которая позволяет рассчитать диапазон входного напряжения усилителя постоянного тока (УПТ). На рисунке 5 изображены снятые на стенде экспериментальные характеристики четырех образцов ВТСП проводников-датчиков (Таблица 1).

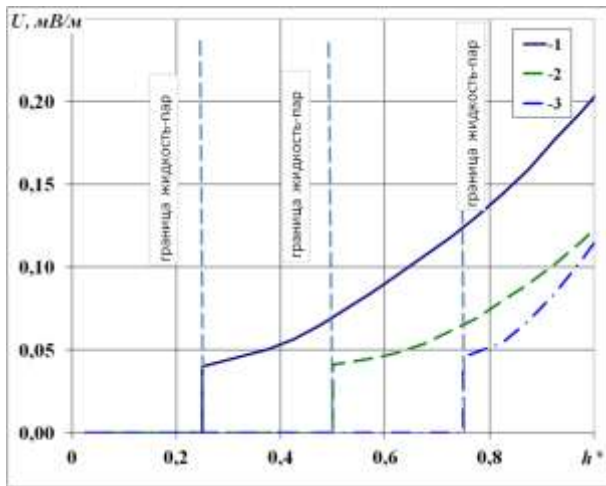


Рисунок 3 – Удельное падение напряжения при разных уровнях заливки (U -образный, изолированный от ОС ВТСП проводник):
1 – $0.25 H_{max}$, 2 – $0.5 H_{max}$, 3 – $0.75 H_{max}$

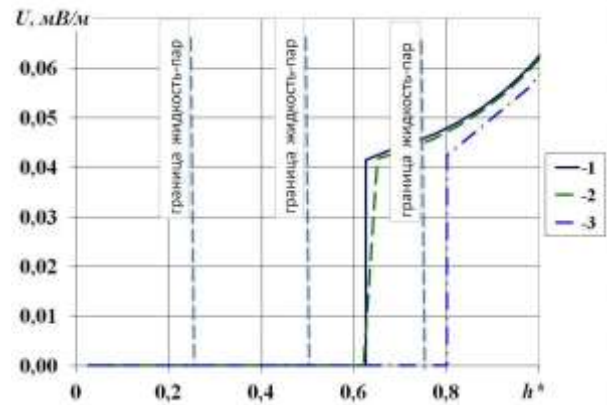


Рисунок 4 – Удельное падение напряжения при разных уровнях заливки (U -образный, контактирующий с ОС):
1 – $0.25 H_{max}$, 2 – $0.5 H_{max}$, 3 – $0.75 H_{max}$

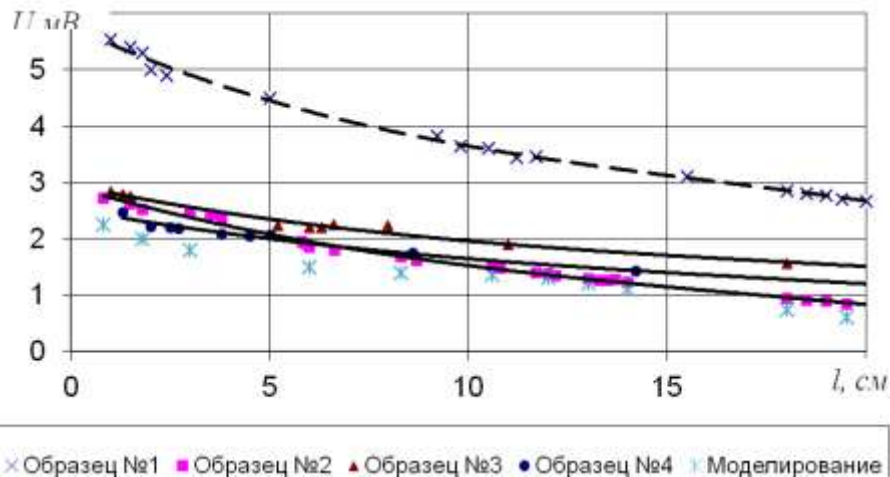


Рисунок 5 – Рабочие $U=f(l)$ характеристики U -образных ВТСП проводников, контактирующих с окружающей средой ($Bi-2223$, $I=100$ мА, $t_{oc} = +25$ °С).

Крестиками «моделирование» на рисунке 5 отмечены данные, рассчитанные по соотношению (4).

Статическая вольт-линейная характеристика $U=f(h)$ является его основной тарировочной 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 сопоставления экспериментальных и расчетных результатов.

IV. ВТОРИЧНЫЙ ПРИБОР ИЗМЕРИТЕЛЯ УРОВНЯ ЖИДКОГО АЗОТА НА ОСНОВЕ ВТСП ПРОВОДНИКОВ

Полученные статические вольт-линейные характеристики ВТСП проводников впоследствии

позволили перейти к проектированию и созданию прибора измерителя уровня криогенной жидкости на их основе.

На рисунке 6 изображена функциональная блок-схема прибора измерителя уровня криогенной жидкости на основе ВТСП.

Устройство состоит из следующих узлов:

Источник тока – вырабатывает постоянный ток требуемой величины для нагрева (перевода в нормальное состояние) датчика и измерения напряжения считывания.

Измерительный ток в течении 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 – восьми разрядный аналогово-цифровой (АЦП) преобразователь последовательного приближения AD7819 преобразует напряжение, соответствующее уровню хладагента в прямой двоичный код.

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

Блок питания преобразует первичное напряжение электросети (220В, 50 Гц) в требуемые постоянные напряжения для питания вышеописан-

ных 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) [3]. Для увеличения шкалы индуктирования уровней до 32 использовался дополнительный дешифратор К155ИД4[5].

Принципиальная схема усилителя постоянного тока (УПТ) вторичного прибора приведена на рисунке 7.

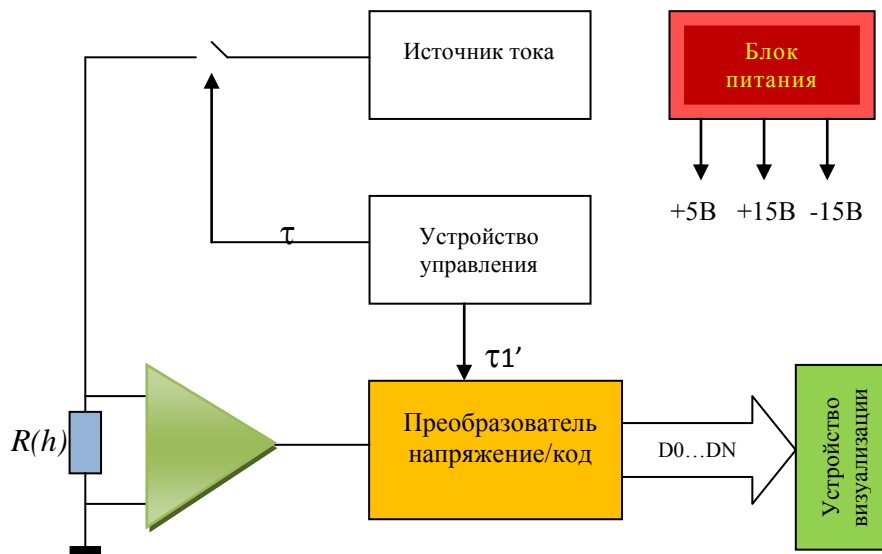


Рисунок 6 – Функциональная схема прибора-измерителя уровня криогенной жидкости.

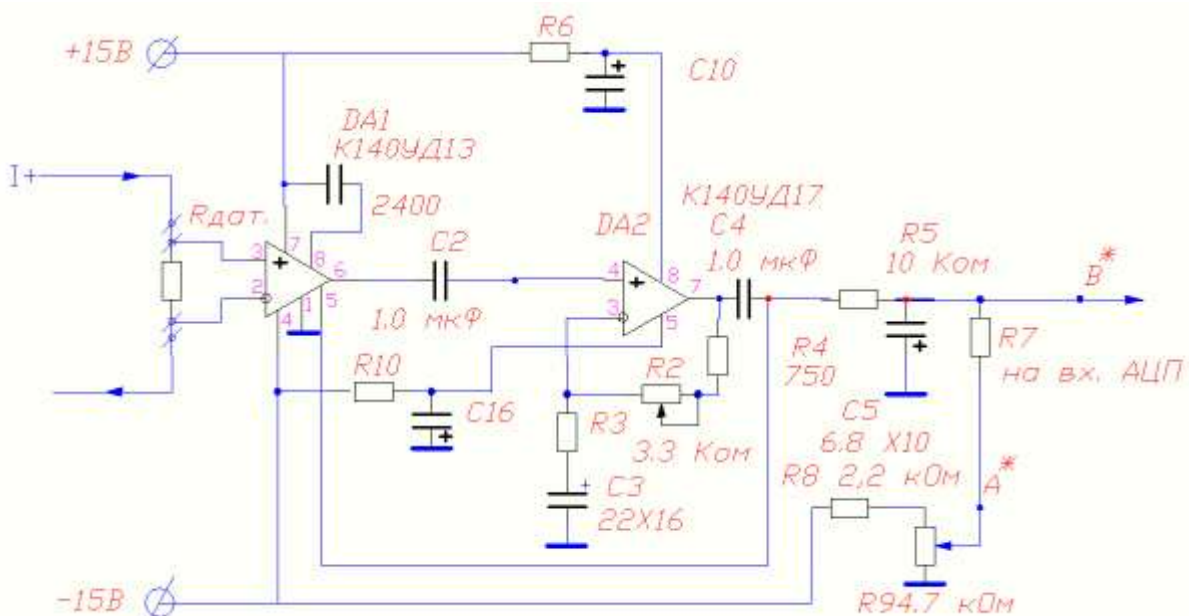


Рисунок 7 – Фрагмент схемы УПТ ВТСП уровнемера.

Постоянное напряжение, снимаемое с ВТСП датчика ($R_{дат.}$) величиной 0,5...2 мВ, усиливается прецизионным, с малым напряжением смещения

нуля ОУ К140УД13 (DA1) МДМ типа. Принцип его работы основан на модуляции снимаемого напряжения внутренними колебаниями ОУ с по-

следующим детектированием (синхронное детектирование).

Поскольку необходимый коэффициент усиления системы те обеспечивается за счет применения только одного ОУ, то в цепь демодуляции включен дополнительный маломощный ОУ (DA2) с внешней регулировкой коэффициента усиления до требуемого значения. Промодулированный 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 измеренной величины происходит с периодичностью поступления тактовых импульсов с выхода мультивибратора выполненного на базе микросхемы КР1006ВИ1 [4].

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 реализована 32-х уровневая светодиодная шкала измерения объема криожидкости.

Полученная после настройки прибора, характеристика отображения уровня жидкого азота светодиодной шкалой приведена на рисунке 8. При построении характеристики проводилось несколько измерений в стационарном режиме.

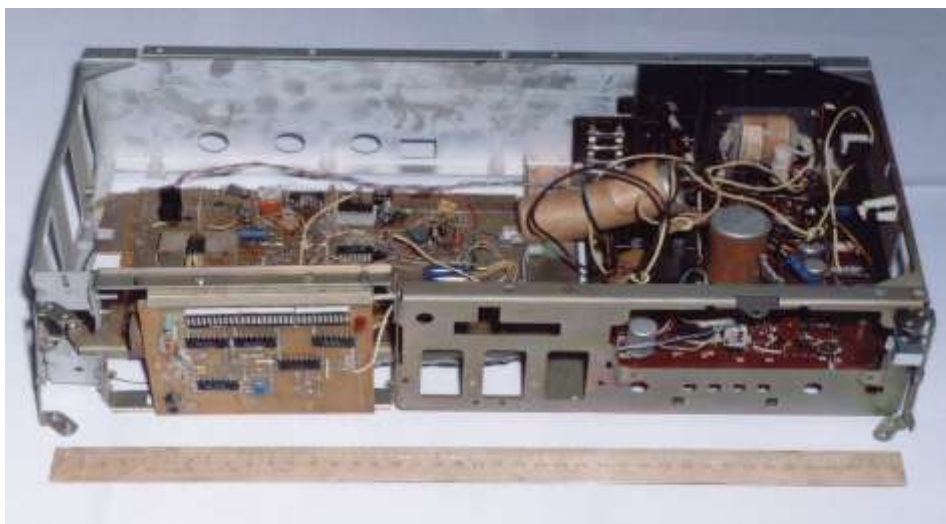


Рисунок 7 – Фото прибора

Рабочая характеристика уровнемера (Эксперимент).

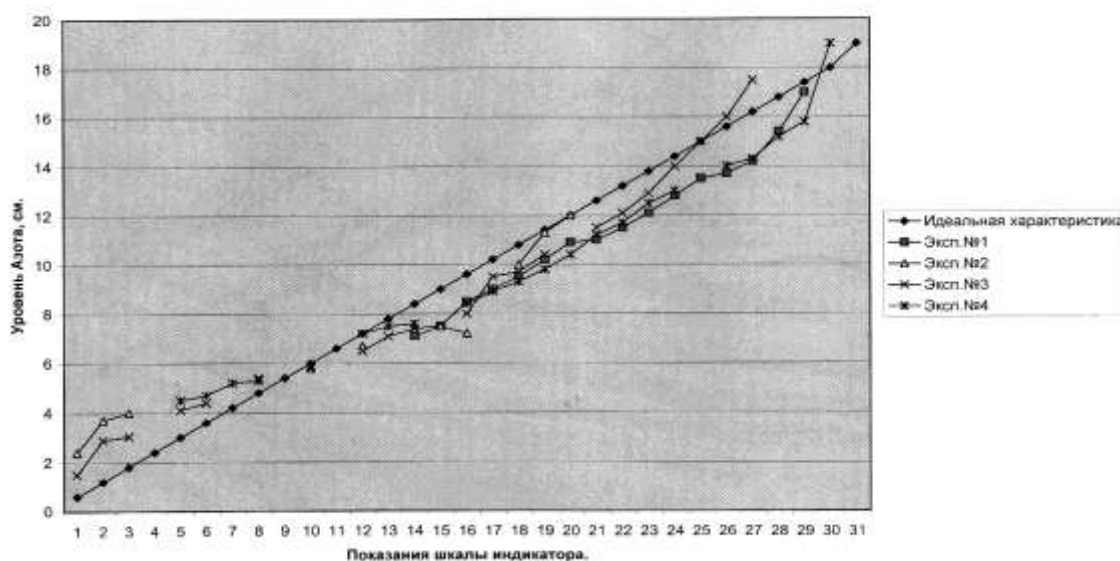


Рисунок 8 – Снятая экспериментально характеристика ВТСП уровнемера (Образец №1).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы был создан уровнемер криогенной жидкости, использующий терморезистивный эффект в серийно выпускаемых композитных высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП). Использование ВТСП обеспечивает уменьшенные осевые теплопритоки к криоагенту, потенциально позволяют получить хорошие инерционные, метрологические и экономические (плата за одно измерение) показатели.

Были изучены результаты моделирования теплообмена ВТСП проводника с жидким азотом. В ходе проведения экспериментов получены экспериментальные рабочие характеристики ВТСП проводников.

Полученные экспериментально вольт-линейные характеристики (зависимость напряжения на конце от протекающего тока) чувствительного элемента позволили сконструировать прототип вторичного прибора-измерителя уровня и провести метрологические испытания на лабораторном сосуде Дюара, хранящего жидкий азот.

По данным метрологических испытаний определена суммарная погрешность измерения уровня вторичным прибором (по отношению к идеальной шкале) в диапазоне $\pm 5 \dots 10$ мм., что соответствует диапазону 5% (в середине шкалы) и 10% (на концах шкалы).

Yu. M. Symonenko¹, V. Yu. Emelianov²

¹ Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatnaya str., Odessa, 65039

² Moscow State Technical University n.a. N.E. Bauman, ul. Baumanskaya 2-ya, 5, Moscow, 105005

THE PROTOTYPE OF SECONDARY DEVICE LEVEL METER OF CRYOGENIC LIQUIDS USED BY METAL OXIDE HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS

The aim was to create a cryogenic liquid the level gauge using thermoresistive effect in composite high-temperature superconductors (HTSC). The use of thin HTS provides reduced heat leakage to the small cryoagent, makes potentially possible obtaining of good inertia, metrological and economic (payment for a single measurement) parameters. The paper discusses the results of heat transfer HTS conductor with liquid nitrogen simulation, experimental performances of HTS conductors are presented. In conclusion secondary device-level meter of liquid nitrogen was designed and developed. Its testing on the laboratory Dewar flask with liquid nitrogen was carried out.

Keywords: high-temperature superconductor, measuring the level of cryogen-liquids, thermoresistive level meter, the secondary device-level meter, level sensor HTS, Dewar flask, liquid nitrogen.

REFERENCES

1. **Dulnev, G.N.** 1963. Heat transfer in electronic devices. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 288 p.
2. **Emelyanov, V.Y., Kolosov, M.A.** 2008. Mathematical modeling of HTS wire level sensor krioliquids. *Chemical and Petroleum Engineering*, No.4, 15–18
3. **Emel'yanov, V.Yu., Kolosov, M.A.** 2008. Mathematical simulation of a HTS wire cryoliquid level indicator. *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 44, 3–4 doi: 10.1007/s10556-008-9037-3
4. **Nefedov A.V., Aksenov A.I.** 1993. Circuit elements everyday radio. Microchips. Part1: Spravochnik.-M.: Radio and communication, 240 p.

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. **V. Yu. Emel'yanov, M. A. Kolosov** / Mathematical simulation of a HTS wire Cryoliquid level indicator // Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 44, Nos. 3–4, 2008
4. **Нефедов А.В., Аksenov А.И.** Элементы схем бытовой радиоаппаратуры. Микросхемы. Часть1: Справочник.-М.: Радио и связь, 1993, 240 с.
5. **Аксененко А.Г.** и др. Применение прецизионных аналоговых микросхем. М. Радио и Связь, 1985. - 256 с.
6. **А.В. Воронов, Г.О.Казанчев** и др. Расчет цепей питания многокаскадного усилителя. Метод. указ., Москва, МВТУ, 1984 г.
7. **Архаров И.А., Емельянов В.Ю., Навасардьян Е.С.**, Моделирование и исследование теплообмена ВТСП проводников в среде жидкого азота. Оценка рабочих характеристик для создания уровнемера криогенной жидкости.(пер. на английский). IRR – International Conference Cryogenics – Bratislava, 2010.

Отримана в редакції 04.11.2014, прийнята до друку 17.11.2014