



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.2:621.317.7

DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-52-54

К. К. КИМ¹

А. А. ТКАЧУК¹

А. А. КУЗНЕЦОВ²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург

²Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ УРОВНЕМЕР ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

Рассматривается измеритель уровня жидкого гелия для транспортных криомодулей высокоскоростного наземного транспорта с магнитным подвесом. Необходимость в разработке подобного измерителя продиктована спецификой функционирования криомодулей, входящих в состав транспортных систем, а именно работой в сильных магнитных полях. Приведен принцип работы измерительной системы уровнемера, сделаны выводы относительно точности его измерений. Установлена возможность использования многоканальной системы уровнемера с датчиками и переключающим устройством в схеме вторичного прибора.

Ключевые слова: уровнемер, жидкий гелий, сверхпроводимость, криомодуль, погрешность измерений, датчики.

Введение. Разработанное устройство предназначено для измерения уровня жидкого гелия в транспортных криомодулях (под криомодулем понимается криостат с размещенным в нем сверхпроводящим соленоидом, выполняющим функции узла подвеса) высокоскоростного наземного транспорта с магнитным подвесом экипажа при заливке криомодулей и в процессе их работы.

Известны уровнемеры с различным принципом работы, например, ёмкостного типа, в котором чувствительным элементом служит специальный конденсатор из концентрических трубок, чья электрическая емкость увеличивается, если уровень

хладагента в кольцевом пространстве поднимается. Этот конденсатор является одним из плеч моста переменного тока, при разбалансе которого сигнал поступает на вторичный прибор.

Неплохо зарекомендовали себя поплавочные уровнемеры, где поплавок соединен с каким-либо электрическим датчиком перемещений. Работа другого широко применяемого указателя основана на измерении гидростатического напора хладагента с помощью дифференциального манометра. Одна сторона манометра соединяется с нижней частью криостата, другая — с паровым пространством над жидким хладагентом.

Сравнительно недорогой и простой указатель уровня основан на зависимости электрического сопротивления от температуры. Через сопротивление пропускается электрический ток, достаточный для существенного повышения температуры сопротивления, когда оно окружено газом. При погружении такого сопротивления в жидкий хладагент температура его значительно понизится вследствие лучшей теплоотдачи.

Использование выше перечисленных уровней в транспортных криомодулях связано с определенными трудностями, а порой просто невозможно, т.к. специфической особенностью эксплуатации последних является необходимость измерения уровня жидкого гелия в двух рабочих положениях криомодуля — в вертикальном положении (сверхпроводящий соленоид выполняет функции возбуждения узла подвеса и тягового линейного синхронного двигателя, как это имеет место в японских системах типа MLU [1, 2]) и в горизонтальном положении криомодуля (сверхпроводящий соленоид выполняет функции возбуждения только узла подвеса, например, японская система типа ML 500).

В связи с этим прибор выполнен двухканальным и позволяет осуществлять контроль обрыва цепей датчика в процессе измерения. Возможность обрыва измерительных цепей потребовала наличия в приборе схем защиты от последствий.

Принцип работы. На рис. 1 изображена функциональная схема устройства для измерения уровня жидкого гелия. Измеритель имеет два датчика Д1 и Д2, которые попеременно могут подключаться к измерительной схеме. Датчик устройства для измерения уровня жидкого гелия представляет собой пластину из текстолита, к которой крепится сверхпроводящая нить, являющаяся основным элементом датчика. Нить выполнена из ниобий-титанового провода ПНТ-033-1. Для увеличения сопротивления провода и уменьшения его критических параметров медное покрытие провода стравливается. Концы провода не травятся, что позволяет припаять его к медным штырям, которые закреплены в стекло-текстолитовой пластине. Для уменьшения погрешности измерения на провод наматываются две нагревательные обмотки, одна из которых намотана равномерно по всей длине, а вторая размещена на верхнем конце провода. Стабилизированные токи в первой обмотке и в проводе подбираются такими, чтобы участок провода над жидким гелием нагревался до температуры выше критической и находился в нормальном (несверхпроводящем) состоянии, а участок провода в жидком гелии оставался сверхпроводящим. Вторая нагревательная обмотка имеет более высокую, чем первая, температуру нагрева, что способствует более быстрому возникновению нормальной фазы при испарении гелия, т.е. повышаются быстродействие и точность прибора. Применение нагревательных обмоток дает возможность использовать сверхпроводящие сплавы, критическая температура которых значительно больше температуры жидкого гелия и которые имеют большие критические магнитные поля, т.е. возможно с помощью данных датчиков измерять уровень гелия при наличии сильных магнитных полей [3–10].

Ток от стабилизатора тока Б1 подается в сверхпроводящий провод датчика Д1 или Д2. Возникающее на датчике напряжение можно измерить с помощью вольтметра. Поскольку напряжение на несверхпроводящем участке обратно пропорционально высоте уровня жидкого гелия, то на вольт-

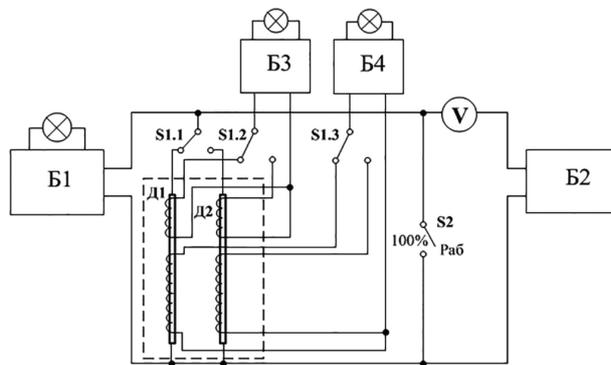


Рис. 1. Функциональная схема измерителя уровня гелия

метр наряду с напряжением от датчика встречно прикладывается напряжение от источника стабилизированного напряжения Б2. Напряжение источника Б2 равно напряжению на полностью несверхпроводящем датчике. Напряжение на вольтметре при отсутствии гелия равно нулю, а при наличии гелия представляет собой разность компенсирующего напряжения и напряжения на датчике. Показание вольтметра прямо пропорционально высоте уровня гелия. При калибровке вольтметра стабилизатором напряжения Б2 вольтметр должен показывать 100 % уровень гелия, что соответствует полному погружению датчика в жидкий гелий.

Для питания нагревательных обмоток датчиков Д1 и Д2 используются стабилизаторы Б3 и Б4. Блоки Б1, Б3, Б4 позволяют контролировать целостность цепей нагрева сверхпроводящей нити и нагревательных обмоток датчиков. При обрыве этих цепей блоки переходят из режима стабилизации тока в режим стабилизации напряжения. О наличии перехода можно судить по загоранию соответствующего светодиода [11–16].

Устройство для измерения уровня жидкого гелия состоит из двух датчиков, размещаемых в криомодуле, и вторичного настольного прибора (масса 5 кг, длина — 300 мм, ширина — 160 мм, высота — 180 мм). В датчике для измерения уровня в горизонтальном положении криомодуля длина сверхпроводящего провода 100 мм, а в датчике для измерения в вертикальном положении — 300 мм. Для каждого датчика подбирается свое значение компенсирующего напряжения, чтобы отклонение стрелки вольтметра было максимальное. Ток питания датчиков выбран равным 500 мА. Нагревательные обмотки выполнены из константановой проволоки марки ПЭШОК диаметром 0,09 мм. Число витков первой распределенной обмотки зависит от длины датчика, а число витков второй верхней обмотки — 200. Токи в обмотках равны соответственно 15 и 150 мА. Тепловыделение в жидкий гелий не более 2 мВт на 1 см длины датчика.

Рассматриваемый двухканальный измеритель уровня жидкого гелия отличается от аналогичных приборов наличием двух датчиков, схем защиты стабилизаторов тока от перегрузки и возможности определения электрической цепи, в которой произошел обрыв [17].

Измеритель первую свою апробацию прошел на установке для измерения потерь в сверхпроводящих образцах в комбинированных магнитных полях, которая была предназначена для измерения потерь в скрещенных магнитных полях при различной ориентации исследуемого образца по отношению

к постоянному магнитному полю калориметрическим методом и методом загущения тока в короткозамкнутом сверхпроводящем образце.

Магнитное поле, действовавшее на образец, создавалось двумя сверхпроводящими обмотками: обмоткой постоянного магнитного поля и обмоткой переменного поля, последняя имела две модификации (обмотка пульсирующего поля и обмотка вращающегося магнитного поля). Постоянное магнитное поле могло достигать величины 3 Т, а переменное — 0,1 Т.

Питание обмотки постоянного поля осуществлялось от генератора постоянного тока типа НДМ-1500/750 мощностью 9 кВт (напряжение 6 В, ток 1500 А) либо от выпрямительного блока ВСА-5К (ток 12 А, напряжение 65 В).

Обмотка переменного поля запитывалась от агрегата, включавшего синхронный трехфазный явнополюсный генератор мощностью 33 кВт с приводным двигателем постоянного тока П-82М мощностью 31 кВт. Возбуждение синхронного генератора выполнялось от возбуждателя П-41 мощностью 27 кВт с приводом от асинхронного двигателя А-42-4.

Исследуемый образец представлял собой либо набор отдельных сверхпроводников, либо катушку малых размеров, питаемую от источника постоянного тока ВСА-5К, с датчиком магнитного поля при исследовании влияния транспортного тока на величину потерь в сверхпроводниках. Исследуемый образец располагался внутри термостата, выход которого был подключен к счетчику газообразного гелия типа ГСБ-400, имеющего пропускную способность 400 л/с. Термостат был расположен в гелиевом криостате, где также находились датчики уровнемера, который использовался в двух режимах: прерывистом (отключался на время действия магнитных полей) либо непрерывном, тогда осуществлялась электромагнитная экранировка датчиков.

Выводы.

1. Проведенные испытания устройства показали, что погрешность измерения уровня жидкого гелия у обоих датчиков не более ± 1 мм.

2. При необходимости вторичный настольный прибор может эксплуатироваться с датчиками других типоразмеров, при этом точность измерения уровня жидкого гелия практически не изменяется.

3. При необходимости возможно изготовление многоканального варианта измерителя уровня жидкого гелия, в этом случае во вторичном настольном приборе устанавливается переключающее устройство.

Библиографический список

1. Ким К. К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости: моногр. М.: Изд-во Учебно-методического центра по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. 360 с. ISBN 978-5-89035-527-0.
2. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. Магнитолевитационная транспортная технология. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 476 с. ISBN 978-5-9221-1540-7.
3. Уилсон М. Сверхпроводящие магниты / пер. с англ. Н. Н. Потапова, А. И. Русинова; под ред. Е. Ю. Клименко. М.: Мир, 1985. 408 с.
4. Глебов И. А., Лаврик И., Шахторин В. И. Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости. Л.: Наука, 1980. 252 с.
5. Зенкевич В. Б., Сычев В. В. Магнитные системы на сверхпроводниках. М.: Наука, 1972. 260 с.
6. Чайт Г. К. Экспериментальная техника в физике низких температур. М.: Физматгиз, 1961. 368 с.

7. Игнатов В. Е., Лутидзе Ш. И., Скобарихин Ю. В. Сверхпроводящие преобразователи на основе энергетических криотронов // *Электричество*. 1982. № 4. С. 36–42.

8. Казаковский Е. Я., Антонов Ю. Ф. Теория сверхпроводящего насоса магнитного потока с платиной // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1972. № 4. С. 66–76.

9. Казаковский Е. Я., Карцев В. П., Шахтарин В. Н. Сверхпроводящие магнитные системы. Л.: Наука, 1967. 323 с.

10. Анисимов Г. Н., Колесова А. В., Саттаров Р. Р. Влияние переменных магнитных полей на сверхпроводящие обмотки возбуждения электрических машин // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2017. № 2 (30). С. 4–12.

11. Ким К. К., Анисимов Г. Н., Барбарович В. Ю. [и др.]. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника. СПб.: Питер, 2006. 367 с.

12. Ким К. К., Барбарович В. Ю., Литвинов Б. Я. Метрология и техническое регулирование. М.: Маршрут, 2006. 255 с.

13. Каштанов А. А., Комяков А. А., Кузнецов А. А., Мешкова О. Б., Пашков Д. В. Метрология и электрические измерения. В 2 ч. Ч. 1. Виды измерений. Обработка результатов наблюдений. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2014. 66 с. ISBN 978-5-949-41094-3.

14. Каштанов А. А., Комяков А. А., Кузнецов А. А., Мешкова О. Б., Пашков Д. В. Метрология и электрические измерения. В 2 ч. Ч. 2. Методы и средства электрических измерений. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2014. 86 с.

15. Dipirro M. J., Serlemitsos A. T. Discrete Liquid/Vapor Detectors for Use in Liquid Helium // *Advances in Cryogenic Engineering*. 1990. Vol. 35. 1617–1623. DOI: 10.1007/978-1-4613-0639-9_191.

16. Celik D., Hilton D. K., Zhang T. [et al.]. Helium II level measurement techniques // *Cryogenics*. 2001. Vol. 41 (5). P. 355–366. DOI: 10.1016/S0011-2275(01)00092-3.

17. Yan L. Development and Application of the Maglev Transportation System // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2008. Vol. 18 (2). P. 92–99. DOI: 10.1109/TASC.2008.922239.

КИМ Константин Константинович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3278-4938, AuthorID (РИНЦ): 690443

AuthorID (SCOPUS): 56092209700

ТКАЧУК Антон Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 7335-2340, AuthorID (РИНЦ): 726854

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск.

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

Адрес для переписки: kuznetsova.ang@gmail.com

Для цитирования

Ким К. К., Ткачук А. А., Кузнецов А. А. Двухканальный электрический уровнемер жидкого гелия // *Омский научный вестник*. 2019. № 4 (166). С. 52–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-52-54.

Статья поступила в редакцию 10.06.2019 г.

© К. К. Ким, А. А. Ткачук, А. А. Кузнецов