

Таблица 2. Результаты проведенных испытаний кабеля КГ-ХЛ 1х185

Марка КИ	I _н , А/I _{ТПЖ} , А	№ эксперимента	Температура, °С	
			ТПЖ	внешняя поверхность оболочки кабеля
КГ-ХЛ 1х185	600/600	1	73,5	63,2
		2	72,8	65,2
		3	73,2	64,1
		Ср. значение	73,2	64,7
	800/800	1	111,2	89,2
		2	116,1	98,2
		3	114,5	90,7
		Ср. значение	113,9	92,7
	1000/1000	1	160,2	118,2
		2	156	125
		3	157,2	121,3
		Ср. значение	157,8	121,5

3. По данным кабеля КГ-ХЛ 1х185 можно сделать вывод что установка работает в установленном диапазоне

4. На данном этапе можно с уверенностью сказать, что установка работает и можно продолжать эксперименты с другими силовыми кабелями с различной изоляцией и в дальнейшем изучать ее свойства

5. Разработанная методика испытаний позволяет комплексно оценить тепловое состояние, сопротивление, влияние высокого напряжения и диэлектрические потери в кабелях в условиях, приближенных к эксплуатационным.

6. Экспериментальная установка также позволяет проводить высоковольтные испытания в условиях, максимально близких к реальным, используя аппарат для испытания диэлектриков АИД-70.

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.П. Здорникова

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ33

Научный руководитель: А.П. Леонов, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Криогенные системы играют важную роль в различных областях науки и техники. Охлаждение до экстремально низких температур позволяет исследовать свойства материалов, а также обеспечивать эффективную работу различных чувствительных приборов. В таких системах происходит значительное уменьшение теплового шума, что позволяет достичь высокой чувствительности в различных приборах, используемых для научных исследований [2].

Однако с преимуществами, которые предоставляют криогенные технологии, также возникают и определенные вызовы, связанные с надежностью работы систем и их компонентов. Надежность криогенных систем напрямую зависит от качества используемых материалов и конструкций, способных выдерживать экстремальные условия. При стабильной работе на низких температурах критически важным становится обеспечение долговечности и надежности всех элементов системы. Это включает как сами криогенные установки, так и кабельные изделия (КИ), соединяющие их с остальным оборудованием.

В связи с этим особое внимание стоит уделить надежности КИ, используемых в криогенных системах. Они должны сохранять свои электрические и механические характеристики в условиях низких температур.

Важно, чтобы электрическое сопротивление КИ изменялось предсказуемым образом при переходе к криогенным температурам, чтобы избежать негативного влияния на функционировании системы. Одной из основных сложностей является то, что изменение сопротивления не всегда подчиняется линейным закономерностям, и это может привести к сложно предсказуемым аномалиям, особенно при температурах, близких к температурам жидкого гелия [6].

Теплоотвод в вакууме, особенно при криогенных температурах, представляет собой сложное явление, которое зависит от множества факторов, включая условия вакуума, свойства материала и геометрию поверхности теплоотводящего элемента. При высоких уровнях вакуума значительное количество воздушных молекул отсутствует, что исключает конвективные и проводящие механизмы теплопередачи. Таким образом, теплоотвод в данных условиях осуществляется за счет теплового излучения. Это означает, что при эффективном теплоотводе можно добиться более низких температур нагрева элементов системы, что в свою очередь повышает долговечность оборудования в целом [4].

Таким образом, для получения более полных результатов при измерении сопротивления токопроводящих жил (ТПЖ) КИ важно учитывать влияние как криогенных температур, так и вакуума как внешних факторов.

Сопротивление ТПЖ при низких температурах и высокой степени вакуума можно определить как экспериментально, так и с применением методов цифрового моделирования. В качестве образцов были использованы провода с медными и стальными токопроводящими жилами калибра AWG 30.

Экспериментальный подход реализован с использованием термовакуумной установки. При помощи вакуумно-откачной системы создается давление не более $1,3 \cdot 10^{-9}$ атм, что соответствует высокой степени вакуума. Далее для достижения пониженной температуры порядка 7 К в камеру подается жидкий гелий. В процессе охлаждения образца необходимо контролировать температуру каждые 30 минут. Температурный режим считается достигнутым в случае изменения температуры на образце (охлаждения) менее 0,5 К в течение двух часов по каждому температурному датчику на образце.

Измерение сопротивления ТПЖ осуществлено при помощи омметра GOM-802 по четырехпроводной схеме. Разделение токовых и измерительных цепей в данной схеме позволяет устранить ошибку, вызванную сопротивлением самой проводки, поскольку это сопротивление не влияет на измеряемое значение. Процесс измерения устойчив к изменениям температуры и другим внешним условиям, благодаря чему обеспечивается высокая стабильность и повторяемость результатов [3].

Данное измерение основано на законе Ома, согласно которому ток (I) через проводник между двумя точками пропорционален напряжению (V) на этих двух точках согласно выражению [1]:

$$R_{exp} = \frac{U}{I}. \quad (1)$$

Как было сказано ранее, для достижения криогенной температуры используется жидкий гелий, который обладает отличными теплофизическими свойствами и способен эффективно охлаждать образцы до необходимого значения.

Однако следует учитывать, что жидкий гелий является очень дорогим ресурсом, и затраты на его приобретение могут существенно увеличивать общую стоимость экспериментальных исследований. Это создает потребность в поиске альтернативных методов, которые позволили бы сократить расходы и ускорить процесс эксперимента.

В связи с вышеизложенным, возникает необходимость в использовании компьютерного моделирования как эффективного инструмента для исследования физики проводников при

низких температурах. Одним из таких инструментов является программное обеспечение *COMSOL Multiphysics*, которое позволяет моделировать различные физические процессы, включая теплопередачу и электрическое сопротивление. Применение моделирования в *COMSOL* дает возможность исследовать зависимости сопротивления проводника от температуры и других параметров без необходимости фактического использования дорогих ресурсов, таких как жидкий гелий.

С помощью моделей кабельных изделий в среде *COMSOL Multiphysics* получены значения сопротивлений испытуемых образцов в условиях вакуума и криогенных температур.

С учетом результатов эксперимента произведен расчет сопротивления ТПЖ по выражению [1]:

$$R_{teor} = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление материала ТПЖ (Ом·м); l – длина образца (м); S – площадь поперечного сечения ТПЖ (м²).

Выражение (2) остается актуальной и для криогенных температур, при условии, что значения удельного сопротивления корректно адаптированы к текущим условиям. Такой подход обеспечивает высокую точность расчетов, что особенно важно для применения в высокоэффективных и чувствительных электрических системах, работающих при низких температурах.

Результаты определения сопротивления ТПЖ из различных материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительная оценка сопротивления токопроводящих жил, выполненных из различных материалов

Материал ТПЖ	Внешние условия	Сопротивление, Ом		
		R_{teor}	R_{model}	R_{exp}
Cu	$T_{ext} = 295 \text{ K};$ $P_{ext} = 1 \text{ атм}$	0,23379	0,22870	0,25
	$T_{ext} = 7 \text{ K};$ $P_{ext} = 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ атм}$	0,002475	0,002491	0,019
Сталь	$T_{ext} = 295 \text{ K};$ $P_{ext} = 1 \text{ атм}$	10,3143	10,283	11,52
	$T_{ext} = 7 \text{ K};$ $P_{ext} = 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ атм}$	6,8762	6,8586	7,75

COMSOL Multiphysics, как и многие другие программные продукты для численного моделирования, может определять электрическое сопротивление проводника, исходя из его удельной проводимости, что является частью общего подхода к анализу электрических свойств материалов.

Удельная проводимость в свою очередь является обратной величиной удельного сопротивления [1].

У большинства металлов, включая медь, при нормальных условиях сопротивление увеличивается с повышением температуры в соответствии с выражением [1]:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (3)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления (1/К).

При нормальных условиях зависимость (3) является линейной что означает, что изменение температуры приводит к пропорциональному изменению сопротивления. Однако, при криогенных температурах зависимость между сопротивлением и температурой, в частности для меди, перестает быть линейной, в результате чего закон Ома перестает выполняться. Это объясняет некоторое расхождение экспериментальных значений и результатов моделирования.

Для стали подобного расхождения не наблюдается, поскольку для данного материала линейность зависимости (3) не нарушается вплоть до достижения криогенных температур [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика. Ч. II. Основы электродинамики. Электромагнитные колебания и волны: учебное пособие / С.И. Кузнецов. – 3-е изд., перераб. доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 253 с.
2. Ekin J. Experimental techniques for low-temperature measurements: cryostat design, material properties and superconductor critical-current testing. – Oxford university press, 2006.
3. Instruments K. Low Level Measurements Handbook // Precision DC Current, Voltage and Resistance Measurements. – 7th ed. – Keithley Instruments Inc.: Cleveland, OH, USA. – 2013. – С. 245.
4. McCarty R.D., Arp V.D. A new wide range equation of state for helium //Advances in Cryogenic Engineering: Part A & B. – Boston, MA : Springer US, 1990. – С. 1465–1475.
5. Simon N.J. Properties of copper and copper alloys at cryogenic temperatures //NIST monograph. – 1992. – Т. 177. – С. “8-6” – “8-22”.
6. White G.K., Meeson P.J. Experimental techniques in low-temperature physics. – Oxford University Press, 2002.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ КУРСОВОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Е.В. Бейерлейн¹, М.А. Проскуряков²

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ,
¹ к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ; ² группа 5A26*

Научный руководитель: Е.В. Бейерлейн, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Современное развитие электроэнергетики невозможно представить без асинхронных двигателей, которые играют ключевую роль в промышленной и бытовой деятельности. Эти машины являются основой для большей части электрических приводов благодаря своей надежности, простоте конструкции и экономичности. В настоящее время один из высокоэффективных методов проектирования является имитационное моделирование.

Имитационное моделирование является важным инструментом при проектировании и исследовании различных систем, включая асинхронные двигатели. Оно позволяет создать виртуальную модель объекта, на основе которой можно проводить анализ, тестирование и оптимизацию без необходимости реализовывать физический прототип.

В процессе моделирования можно реализовать статическое и динамическое моделирование, которое позволяет анализировать работу двигателя как в стационарных, так и в переходных режимах. Системный анализ оценивает взаимодействие между различными элементами системы, такими как контроллеры, преобразователи частоты и электрические нагрузки, а оптимизация позволяет находить наилучшие проектные решения, сокращая затраты и повышая эффективность.

В рамках курсового проектирования студенты могут использовать имитационные модели для выполнения следующих задач:

- Разработка модели асинхронного двигателя на основе заданных параметров.
- Исследование влияния различных факторов на работу двигателя (нагрузка, частота, питание).
- Анализ результатов моделирования с целью оптимизации проектных решений.
- Визуализация процессов, что способствует лучшему пониманию принципов работы асинхронных двигателей.

Использование имитационного моделирования в курсах проектирования асинхронных двигателей имеет целый ряд преимуществ, а именно моделирование позволяет избежать необходимости в создании физических прототипов, что значительно снижает расходы на ма-