

*Bauyrjan K. Bekenov,
Master student,
Eurasian National University n.a. LN. Gumilev*

Research and Production of Transformers with Heat Resistant Insulating Materials

Key words: *electrical insulation elements, transformers, insulation materials.*

Annotation: *At the present stage of development of manufacturing transformers in Kazakhstan and questions about the use of insulating materials for dry-type transformers. The urgency of this problem is due to provide electrical insulation elements in conductive electrical devices between different potentials. By increasing the potential difference (voltage) occurs in isolation critical voltage, where the insulation breaks. This is called the breakdown voltage and insulation property maintaining a certain tension for a long time called the dielectric strength. The aim of the work is to analyze the insulation materials used in transformers, their types and properties.*

1. Вступление. Каждым годом увеличивается зависимость электропитания нашего общества, спрос на надежное энергоснабжение растет. Мощность энергетической системы обычно состоит из большого количества мест генерации, точек распространения, и объединения с большей системой или ближайшими системами. Силовые трансформаторы должны быть использованы в каждой точке, где есть переход между уровнями напряжения. По этой причине, трансформаторы являются одним из наиболее стратегически важных компонентов для производства электроэнергии, передачи и распределения. Ожидается, что они надежно и эффективно будут функционировать в течение многих лет.

Трансформатор представляет собой статический электромагнитный аппарат с первичной и вторичной обмотками, предназначенный чаще всего для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения.

2. Трансформатор напряжения типа ЗНОЛ-27,5 УЗ. Трансформатор напряжения типа ЗНОЛ класса напряжения 6 кВ, 10 кВ и 35 кВ однофазный с естественным воздушным охлаждением предназначен для выработки сигнала измерительной информации для измерительных приборов, цепей автоматики, сигнализации и цепей защиты в цепях с изолированной нейтралью.

Трансформаторы предназначены для эксплуатации в районах с умеренным климатом при:

- невзрывоопасной, не содержащей токопроводящей пыли окружающей среде;
- высоте установки над уровнем моря не более 1000 м.

По защищенности от воздействия окружающей среды трансформаторы выполнены по ГОСТ 15150 в исполнении УЗ, для работы при температурах от минус 45°С до плюс 40°С.

Условное обозначение типа трансформатора: ЗНОЛ - X - XX

З – заземляемый

Н – трансформатор напряжения

О – однофазный

Л – естественной циркуляцией воздуха

-X – класс напряжения со стороны ВН, кВ

XX – климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150

Трансформатор выполнен в виде опорной конструкции. Корпус трансформатора изготавливается из эпоксидного компаунда, который одновременно является главной изоляцией и обеспечивает защиту обмоток от механических и климатических воздействий.

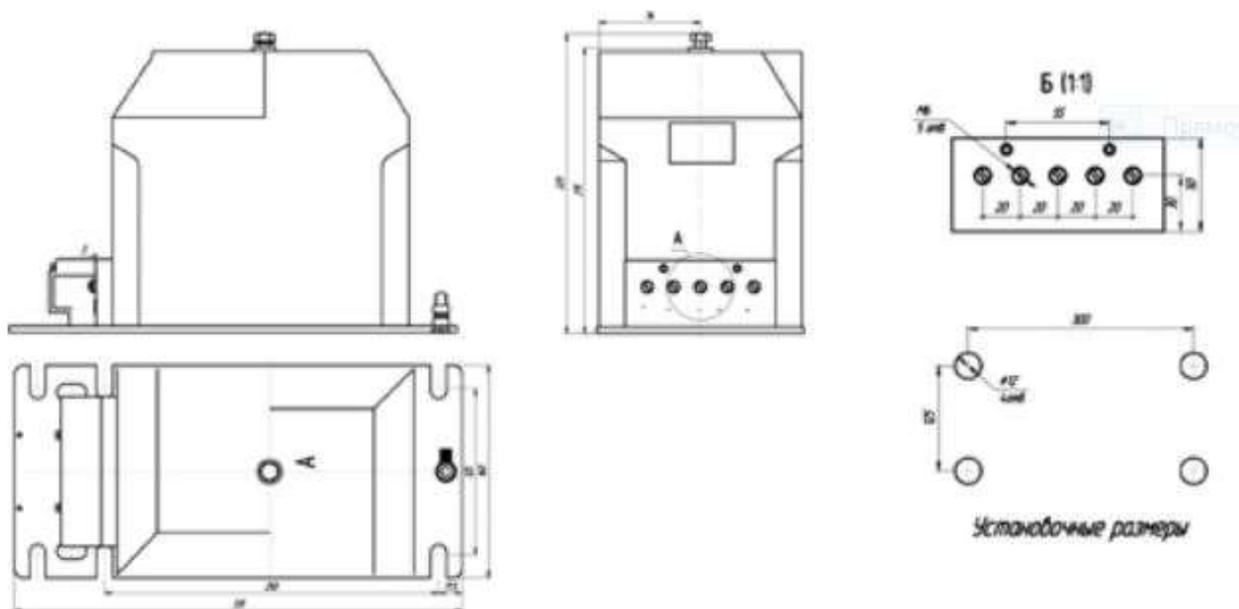


Рис.1. Габаритные размеры трансформатора напряжения типа ЗНОЛ-27,5 УЗ

Расположение выводов трансформаторов:

- высоковольтный вывод «А» и заземляющий вывод «В» первичной обмотки расположен на верхней части трансформатора;
- выводы вторичных обмоток «а», «в» располагаются в нижней части трансформатора.

Трансформатор имеет болт заземления, который расположен на основании. Для исполнений без металлического основания болт заземления располагается на корпусе трансформатора (1).

Основные технические и метрологические характеристики трансформатора приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Значение
Класс напряжения, кВ	27,5
Номинальное напряжение первичной обмотки, кВ	27,5
Номинальное напряжение основной вторичной обмотки, В	100
Предельная мощность, ВА	1000
Номинальная мощность, для классов точности, ВА: - 0,2 - 0,5 - 1,0 - 6 P	15 75 - 100
Номинальная частота, Гц	50
Диапазон рабочих температур, °С	от минус 45 до плюс 40
Диапазон температур для хранения и транспортирования °С	от минус 50 до плюс 50
Габаритные размеры, не более, мм	545x280x510
Масса, кг, не более	80
Средний срок службы, не менее, лет	25

3. Результаты испытаний. Все испытания были проведены на базе АО "Alageum group", Кентауского трансформаторного завода г.Кентау, Южно-Казахстанская область, Республика Казахстан.

3.1. Испытания коррозионного воздействия на пластинки трансформатора напряжения типа ЗНОЛ-27,5 УЗ.

Испытания были проведены при следующих условиях:

- температура окружающего воздуха 21°С,
- относительная влажность воздуха 57 %
- атмосферное давление 92,2 кПа

Показания снимались прибором для поверки трансформаторов тока и напряжения К-507, образцовым трансформатором напряжения, магазином нагрузок КПЛ 35.

Результаты испытаний:

Таблица 2.

Вторичная обмотка	Нагрузк	% от	Погрешность напряжения (%)	Угловая погрешность (в минутах)
-------------------	---------	------	----------------------------	---------------------------------

(измерительная)	a (В·А)	V _g	Измеренное значение	Погрешность (%)	Измеренное значение	Погрешность (в минутах)
a-b (класс 0,5)	18,75 (25 %)	120	0,37	± 0,5	13,42	± 20
		100	0,39		17,59	
		80	0,42		18,21	
		50	0,44		18,87	
		20	0,40		18,43	

Таблица 3.

Вторичная обмотка (измерительная)	Нагрузка a (В·А)	% от V _g	Погрешность напряжения (%)		Угловая погрешность (в минутах)	
			Измеренное значение	Погрешность (%)	Измеренное значение	Погрешность (в минутах)
a-b (класс 0,5)	75 (100 %)	120	0,28	± 0,5	15,73	± 20
		100	0,36		17,75	
		80	0,39		19,63	
		50	0,41		18,51	
		20	0,37		18,05	

Нормальное исполнение предназначено для работы аппаратуры в условиях нормальной влажности при отсутствии в воздухе активных газов, температура воздуха от +25 до +45°C, т. е. в основном для аппаратуры, работающей в закрытых и отапливаемых помещениях. Влагостойкое исполнение особенно необходимо в местах с жарким и сырым климатом. Количество влаги в воздухе зависит от температуры воздуха и от степени влажности. В 1 м³ воздуха при его насыщении находится воды в виде пара при температуре 0; 20; 40; 60° С соответственно 6; 24; 75; 130 г. Нормальной влажностью считается воздух, содержащий 60—65% влаги от предела насыщения, сырым — содержащий более 80%, сухим — менее 40%. При повышенной температуре воздуха нормальной влажности соответствует значительно большая абсолютная влажность, т. е. количество влаги в 1 м³ воздуха.

3.2. Исследование термических свойств трансформатора напряжения типа ЗНОЛ-27,5 УЗ при различных температурах.

Измерения проводили при внешней температуре t=21 °С, относительной влажности воздуха φ = 57%, атмосферном давлении 92,2 кПа. После измерений при температуре t=21 °С, трансформатор поместили в многоконтактное реле температуры, и получали различные температуры. Расчеты проводились с помощью преобразователя

напряжения, прибора эталонного многофункционального Энергомонитор 3,1К, и магазина нагрузок МР 3025.

Таблица 4. Измерения погрешностей напряжения при $t = +21\text{ }^{\circ}\text{C}$

Вторичная обмотка (измерительная)	Нагрузка (В·А)	% от V_g	Погрешность напряжения (%)		Угловая погрешность (в минутах)	
			Измеренное значение	Погрешность (%)	Измеренное значение	Погрешность (в минутах)
a-b (класс 0,5)	18,75 (25 %)	120	0,38	$\pm 0,5$	14,58	± 20
		100	0,40		18,12	
		80	0,41		18,31	
		50	0,45		18,92	
		20	0,42		18,54	

Таблица 5. Измерения погрешности напряжения при $t = -45\text{ }^{\circ}\text{C}$

Вторичная обмотка (измерительная)	Нагрузка (В·А)	% от V_g	Погрешность напряжения (%)		Угловая погрешность (в минутах)	
			Измеренное значение	Погрешность (%)	Измеренное значение	Погрешность (в минутах)
a-b (класс 0,5)	75 (100 %)	120	0,29	$\pm 0,5$	14,48	± 20
		100	0,37		17,24	
		80	0,40		19,23	
		50	0,42		18,41	
		20	0,39		17,54	

Таблица 6. Измерения погрешности напряжения при $t = +45\text{ }^{\circ}\text{C}$

Вторичная обмотка (измерительная)	Нагрузка (В·А)	% от V_g	Погрешность напряжения (%)		Угловая погрешность (в минутах)	
			Измеренное значение	Погрешность (%)	Измеренное значение	Погрешность (в минутах)
a-b (класс 0,5)	18,75 (25 %)	120	0,38	$\pm 0,5$	12,11	± 20
		100	0,36		16,44	

		0				
		80	0,40			17,13
		50	0,46			17,44
		20	0,41			17,58
a-b (класс 0,5)	75 (100 %)	12	0,31	± 0,5		14,55
		0				
		10	0,34			16,88
		0				
		80	0,42			18,16
		50	0,44			17,22
		20	0,35			16,77

Таблица 6. Измерения погрешности напряжения при $t = -50^{\circ}\text{C}$

Вторичная обмотка (измерительная)	Нагрузка (В·А)	% от V_g	Погрешность напряжения (%)		Угловая погрешность (в минутах)	
			Измеренное значение	Погрешность (%)	Измеренное значение	Погрешность (в минутах)
a-b (класс 0,5)	18,75 (25 %)	12	0,38	± 0,5		13, 11
		0				
		10	0,40			17,08
		0				
		80	0,43			18,45
		50	0,45			18,19
		20	0,42			18,00
a-b (класс 0,5)	75 (100 %)	12	0,29	± 0,5		15,04
		0				
		10	0,32			16,71
		0				
		80	0,41			18,77
		50	0,43			18,08
		20	0,39			17,46

Таблица 6. Измерения погрешности напряжения при $t = +50^{\circ}\text{C}$

Вторичная обмотка (измерительная)	Нагрузка (В·А)	% от V_g	Погрешность напряжения (%)		Угловая погрешность (в минутах)	
			Измеренное значение	Погрешность (%)	Измеренное значение	Погрешность (в минутах)
a-b	18,75	12	0,38		14, 58	

(класс 0,5)	(25 %)	10	0,40	± 0,5	18,12	± 20
		0			18,31	
		80	0,41		18,92	
		50	0,45		18,54	
a-b (класс 0,5)	75 (100 %)	12	0,29	± 0,5	14,48	± 20
		0			17,24	
		10	0,37		19,23	
		0			18,41	
		80	0,40		17,54	
		50	0,42			
	20	0,39				

3.3. Исследования с применением эпоксидной смолы в качестве изоляционного материала. Отвержденные смолы характеризуются высокой адгезией к металлам, стеклу, бетону и другим материалам, механической прочностью, водо- и химической стойкостью, хорошими диэлектрическими показателями. Эпоксидные смолы способны отверждаться в обычных условиях, а также при пониженных (до -15°C) или повышенных ($+60... +125^{\circ}\text{C}$) температурах. В качестве отвердителей используются полиамины, многоосновные кислоты и их ангидриды, многоатомные фенолы, третичные амины. Отличительная особенность эпоксидных смол при отверждении - отсутствие выделения летучих веществ и малая усадка (0,1 - 3%). Эти смолы применяются в электротехнической и радиоэлектронной промышленности, авиа-, судо- и машиностроении, а также в строительстве - как компонент заливочных и пропиточных компаундов, клеев, герметиков, связующих для армированных пластиков (2).

Реологические характеристики эпоксидной смолы являются наиболее важным фактором для улучшения операционной эффективности и по усилению безопасности условий труда на производстве. В данном исследовании изменение вязкости наблюдалось с ростом количества упрочняющего элемента диоксида кремния (SiO_2). Вязкость была измерена в диапазоне температур от 30°C до 90°C , при этом рабочий диапазон температуры составляет $40-60^{\circ}\text{C}$. Вязкость была измерена экспериментально, с помощью изменении количества диоксида кремния в диапазоне 10-60% по весу с помощью вискозиметра Брукфилда (DV-II + Pro). Термическую стабильность эпоксидной смолы оценивали с помощью бисфенола-А эпоксидной смолы, отвердителя полиамида, и модифицированного отвердителя (циклоалифатический амин). Пресс форма использовалась как панель тестирования и была изготовлена из формы размерами 100 мм x 100 мм x 100 мм, ширина, глубина и высота, соответственно (рис. 2).

Смесь эпоксидной смолы и отвердителя выливали в форму и держали 70 мин при температуре $t=60^{\circ}\text{C}$ после появления пузырей. Диоксид кремния (SiO_2) был выбран в качестве укрепляющего элемента и термическая стабильность была оценена

по содержанию диоксида кремния. Термическая стабильность была протестирована в печах с диапазоном температур от 120 °С до 180 °С и были измерены коэффициент термической деформации (β). Расчеты были проведены по формуле:

$$\beta = \left| 1 - \frac{(x_f - x_i)}{x_i} \right| \left| 1 - \frac{(y_f - y_i)}{y_i} \right| \left| 1 - \frac{(z_f - z_i)}{z_i} \right| \quad (1)$$

где, x_f, y_f, z_f , - ширина, длина и высота в мм после аксиального термического теста, x_i, y_i, z_i - размеры до испытания в мм.



а) вискозиметр Брукфилда (DV-II + Pro)



б) Форма и образцы эпоксидной смолы с диоксидом кремния

Рис. 2.

Диоксид кремния (SiO_2) был выбран в качестве укрепляющего элемента, чтобы улучшить механические свойства и термическую стабильность трансформатора. Добавление диоксида кремния (SiO_2) способен улучшить термическую стабильность трансформатора, но его работоспособность уменьшается с увеличением вязкости смеси эпоксидной смолы с диоксидом кремния. Таким образом изменение вязкости смеси эпоксидной смолы с диоксидом кремния (SiO_2 , диоксид кремния выступал в качестве

укрепляющего элемента) с ростом температуры показан на рис.3.

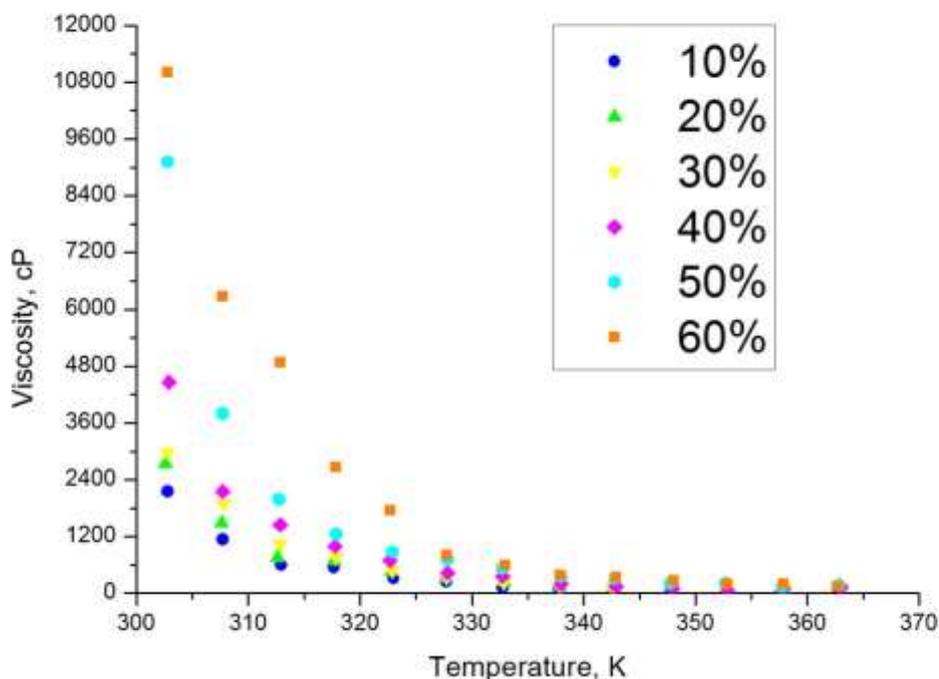


Рис. 3. Изменение вязкости эпоксидной смолы содержащую диоксид кремния (%).

4. **Анализ.** Исследования были проведены с целью проверки нового трансформатора напряжения типа ЗНОЛ-27,5 УЗ с использованием эпоксидной смолы, содержащей диоксид кремния (SiO_2). Термические испытания были проведены в широком диапазоне температур, от $-50\text{ }^\circ\text{C}$ до $+50\text{ }^\circ\text{C}$, и показали, что погрешность напряжения на трансформаторе незначительно. Трансформатор показал хорошую работоспособность, как при повышенных температурах, так и при повышенной влажности. С большим увеличением температуры физические свойства смолы могут ухудшиться. Таким образом, важно контролировать температуру во время эксплуатации. При температурах ниже $100\text{ }^\circ\text{C}$ химическое соединение эпоксидной смолы оказалось устойчивым.

При высоких температурах физические свойства смолы могут ухудшиться. Таким образом, важно контролировать температуру во время эксплуатации. При температурах ниже $100\text{ }^\circ\text{C}$ химическое соединение эпоксидной смолы устойчивое. В данной работе экспериментально были проведены исследования добавления диоксида кремния (SiO_2) в качестве отвердителя, что способствовала улучшению механических свойств и термической стабильности трансформатора. Был проделан анализ по оптимальному содержанию диоксида кремния:

1) Вязкость уменьшается с увеличением температуры, и увеличивается с содержанием по весу диоксида кремния.

2) Вязкость должна контролироваться в диапазоне 5000–7000 сР, что позволяет поддерживать нормальную работоспособность трансформатора с изоляцией эпоксидной смолы при температурах 50-60 °С

3) Самое лучшее содержание диоксида кремния (SiO₂) не меньше 50% в смеси (3).

5. Заключение. При изготовлении трансформаторов немаловажную роль играет применение изоляционных материалов. Также их термические свойства, влагостойкости и химической стойкости являются основными критериями качества и долгосрочности электрооборудования.

В результате проведенных испытаний установлено, что образцы трансформаторов напряжения типа ЗНОЛ-27,5 УЗ, производства АО «Кентауский трансформаторный завод», г. Кентау с использованием эпоксидной смолы, содержащей диоксид кремния (SiO₂) соответствуют требованиям ГОСТ 1983-2001 и готов к эксплуатации.

References:

1. *Catalogue of power transformers and cabinet designs JSC "Alageum group", Kentaу Transformer Plant*
2. *Rychkov SN. Cast insulation in transformers: Energy and Industry of Russia, № 10. 2009.*
3. *Seung-Bum Lee, In-Kwon Hong - Thermal deformation of epoxy type resin for transformer: Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 17 (2011): 404-409.*