

В.В. Прохоров

(Россия, г.Хотьково, ЗАО «Диэлектрик», генеральный директор)

КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СИСТЕМЫ ИЗОЛЯЦИИ

Оценка качественных характеристик систем изоляции электрических машин должна производиться путем замера конкретных показателей в условиях реально работающей под максимальной нагрузкой электрической машины, т. е. при наличии температур возможного перегрева узлов машины (катушек магнитной системы, секций якоря и т.п.) до 200°C и возможных скачков напряжения в сети. Подход должен рассматриваться с точки зрения теории химии и физики диэлектриков [1].

Учитывая, что система изоляции, например, для тяговых электродвигателей (ТЭД), представляет собой запеченную в монолит композицию из нескольких различных электроизоляционных материалов, оценку ожидаемых конечных результатов можно делать с определенным приближением, исходя из свойств конкретных электроизоляционных материалов (ЭИМ).

Показатели, определяющие надежность ЭИМ это:

1. *Диэлектрические потери*. Возникают за счет наличия тока утечки $I_{\text{ут}}$, который состоит из:

а) тока сквозной проводимости $I_{\text{скв}}$ – обусловлен наличием в диэлектриках свободных носителей заряда различной природы;

б) тока смещения $I_{\text{см}}$ – обусловлен наличием процессов быстрой поляризации в момент включения и выключения напряжения;

в) тока абсорбции $I_{\text{абс}}$ – обусловлен процессами замедленных поляризаций.

Величина этих токов очень зависит от температуры и напряжения. В диапазоне температур от 120 до 200°C наблюдается рост тока утечки в сотни раз. Оценка величины тока утечки оценивается путем измерения тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$. Физическое значение $\text{tg } \delta$ можно понять из следующего.

В случае идеального диэлектрика (представим себе конденсатор без потерь) – вектор тока и вектор напряжения находятся под углом 90° . В случае появления тока утечки этот угол сдвигается на какую-то величину δ . Прямоугольный треугольник, катетами которого являются активная и реактивная составляющие тока утечки, а вершиной – угол δ , позволяет сделать оценку диэлектрических потерь, через отношение активной составляющей тока потерь к реактивной составляющей, а это и есть $\text{tg } \delta$. С увеличением активной составляющей

возрастает $tg \delta$. Активная составляющая тока утечки $I_{a.ут}$ – это именно тот ток, который вызывает тепловой разогрев диэлектрика и его прожог.

Таким образом, ток $I_{a.ут}$ можно оценить путем измерения $tg \delta$ и определять его величину в зависимости от температуры измеряемого объекта.

Работы, проведенные в области определения допустимого значения $tg \delta$, показывают, что при $tg \delta \leq 30\%$ опасений относительно возникновения величин токов утечки, приводящих к тепловому пробою изоляции, нет. Это значение было выбрано нами критичным в части оценки работоспособности ЭИМ. Класс нагревостойкости ЭИМ также следует оценивать с учетом вышеизложенного, т. е. $tg \delta$ при определенном классе нагревостойкости должен быть не более 30%.

На рис. 1 изображен график зависимости тангенса угла диэлектрических потерь при испытательном напряжении 1 кВ от температуры для дисков толщиной 1 мм, полученных из испытываемых пропиточных составов. Испытания проводились согласно требованиям ГОСТ 64334-71 [2]. Анализ графика показывает, что к классу Н следует отнести компаунды КП-303Н, ПК-11 с металлоорганическим ускорителем, а все остальные – это класс В – F.

На рис. 2 представлен график зависимости $tg \delta$ от напряжения при $T = 160^\circ C$.

Значения $tg \delta \leq 30\%$ в интервале напряжений свыше 10 кВ имеют всего лишь 2 компаунда КП-303Н и ПК-11 с металлоорганическим ускорителем и два лака ЭП-9150 и КО-916. Это позволяет классифицировать эти компаунды и лаки в качестве пропиточных составов для высоковольтных электрических машин.

2. Теплопроводность.

Значение этого показателя неразрывно связано с нагревом и отводом тепла от узлов электрической машины в рабочем установившемся режиме. Естественно приоритет должен быть за материалами, обладающими лучшими коэффициентами теплопроводности.

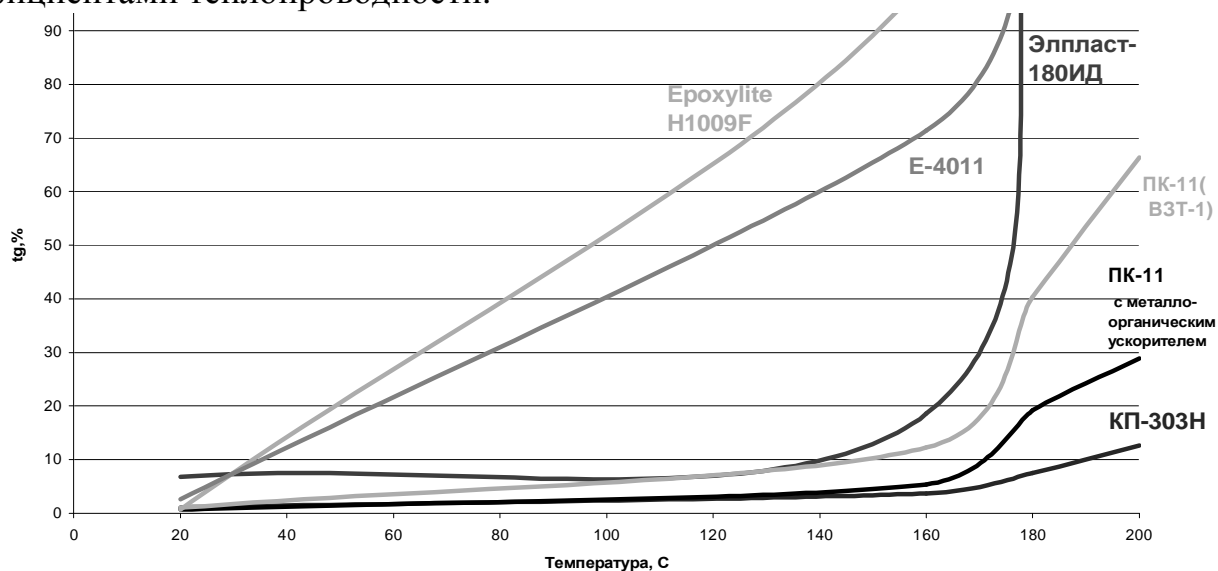


Рис. 1. График зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для различных пропитывающих составов

(испытания проводились на дисках толщиной 1 мм, все диски запекались при температуре 160° С в течение 16 часов)

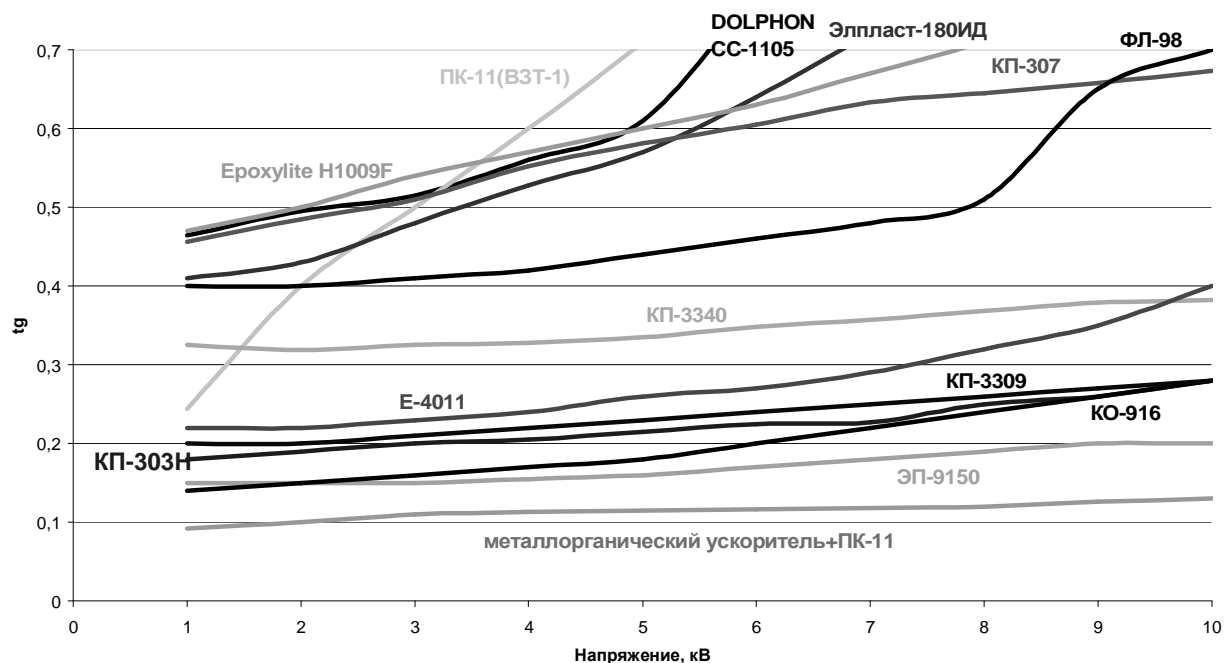


Рис. 2. График зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от напряжения для различных пропитывающих составов (температура испытания 160° С)

Теплопроводность определяли зондовым методом по ГОСТ 30256-94 [4] с помощью измерителя теплопроводности МИТ-1 (ТУ 4211-001-302531012-02; св. о поверке №8246 от 02.02.2009г. ФГУ ЧЦСМ; основная отн. погрешность измерения $\pm 7\%$).

На рис. 3 представлена оценочная величина коэффициента теплопроводности. Величина повышенной теплопроводности диэлектриков определяет их более высокую пригодность. Сравнительные данные по коэффициенту теплопроводности для пропиточных составов такие: ПК-11 ($\lambda = 0,177$); Элпласт – 180ИД ($\lambda = 0,187$) и КП-303Н ($\lambda = 0,216$). Лучший показатель имеет КП-303Н.

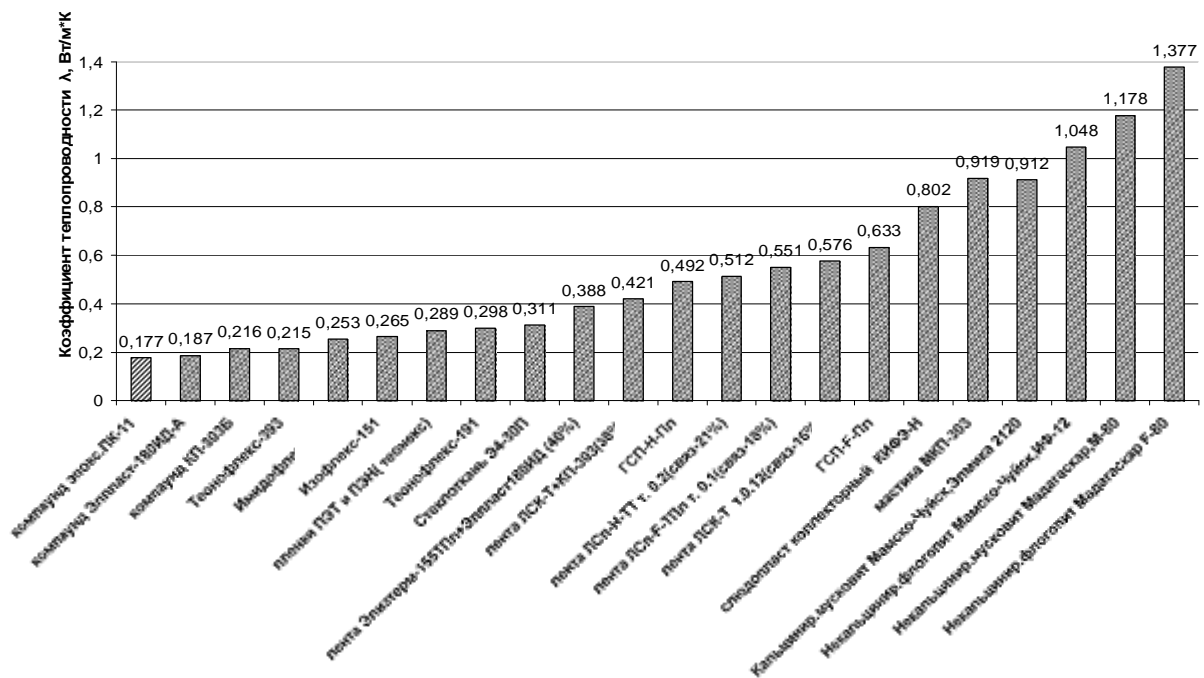


Рис. 3. Теплопроводность электроизоляционных материалов

3. Цементация.

Испытания проводились согласно требованиям ГОСТ 13526-89 [5]. Лаки и эмали электроизоляционные. Методы испытаний.

На рис. 4 приведен график зависимости цементирующей способности пропиточных составов от температуры. Значение этого показателя важно для обеспечения виброустойчивости работы электрической машины. Цементация при температурах выбранного класса нагревостойкости должна быть не менее 40 Н.

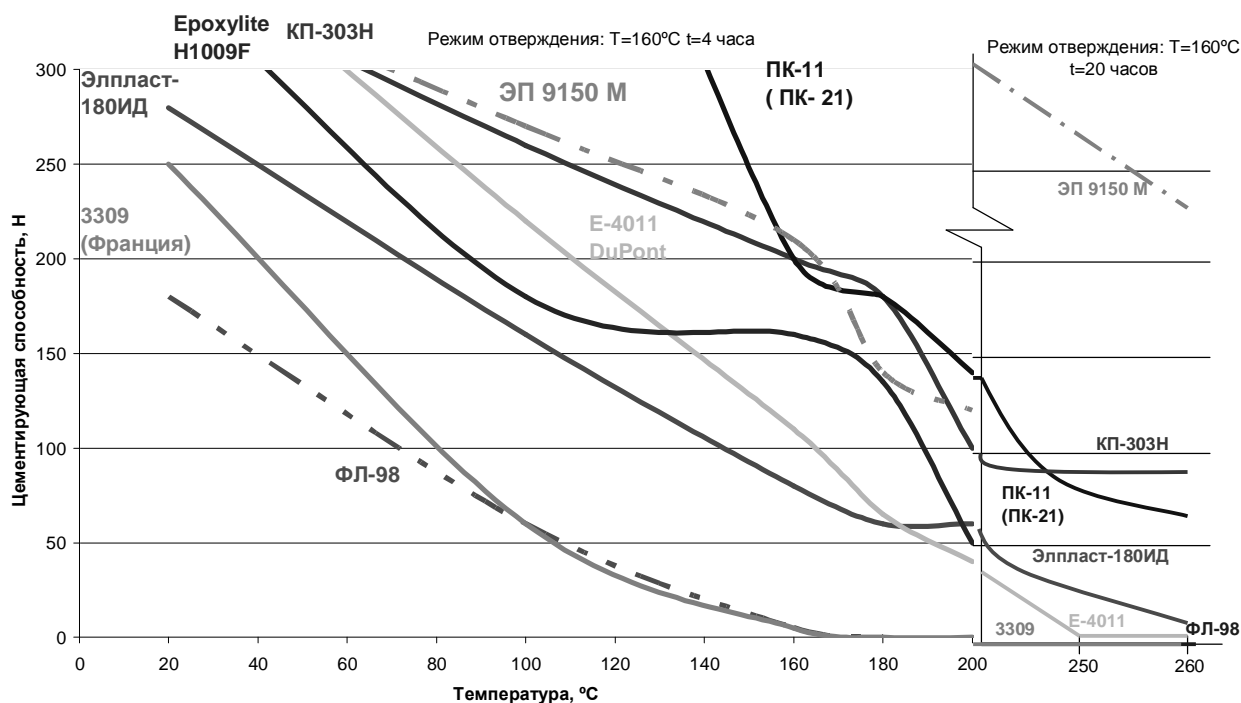


Рис. 4. График зависимости цементирующей способности от температуры различных пропитывающих составов

Из выбранных восьми испытуемых составов шесть обеспечивают требуемое значение для класса нагревостойкости Н (180° С). При этом в число компаундов попадают всего лишь 4 наименования: это КП-303Н, Элпласт-180, ПК-11 с металлоорганическим ускорителем и Eroxylite H1009F.

В промышленном производстве большое значение имеют и **показатели, определяющие технико-экономическую характеристику системы изоляции**, а именно:

1. Технологичность;
2. Энерго-трудозатраты;
3. Сроки хранения ЭИМ и пропиточных составов;
4. Аллергенность.

Для обеспечения *технологичности*, чтобы стеклослюдоленты хорошо утягивались и не пылили, следует использовать стеклослюдоленты полупропитанные, содержащие $\approx 15 - 20\%$ связующего, в том числе $\approx 10\%$ компаунда, которым должна производиться пропитка собранных катушек и якоря. Пропиточный состав должен быть однокомпонентным с высокой скоростью и степенью полимеризации при $T \geq 150^\circ \text{C}$, обладать высокой пропитывающей способностью, и сохранять свои свойства при $T = 50^\circ \text{C}$ не менее 30 дней.

На рис. 5 изображена кривая длительности хранения пропиточных составов при $T=50^\circ \text{C}$ отечественных производителей, а именно: КП-303Н – ЗАО "Диэлектрик", Элпласт-(155-180)ИД – ЗАО "Электроизолит", ПК-11 – ХК "Элинар". По результатам испытаний сохранность свойств у КП-303Н практически в три раза выше, чем аналогов и составляет около трех месяцев.

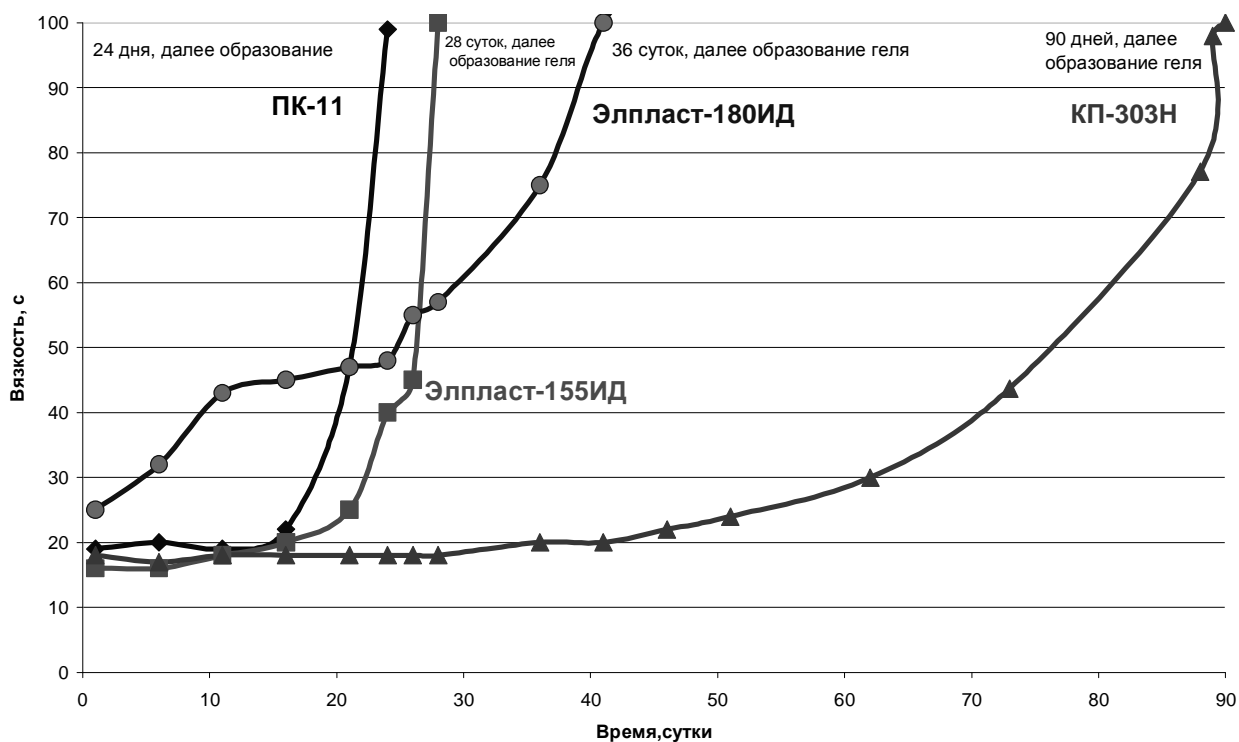


Рис. 5. Зависимость вязкости компаундов ПК-11, Элпласт-155ИД и КП-303Н от времени хранения при 50° С

Сравнительные испытания указанных пропиточных составов показали:

1. Элпласт-(155-180)ИД следует классифицировать по классу нагревостойкости F. Применять в качестве пропиточного состава только подогретым до 50°С, ежедневно обновляя добавкой порядка 10% свежего компаунда из-за нарастания вязкости. Учитывая высокую зависимость $tg \delta$ от напряжения не рекомендуется его применение для электрических машин напряжением выше 3 кВ.

2. ПК-11 с металлоорганическим ускорителем – следует классифицировать по классу нагревостойкости H. Применять только в системе с сухими лентами содержащими металлоорганический ускоритель, – что обеспечивает качество изоляции, в том числе для высоковольтных электрических машин. Пропитку следует проводить в подогретом до 50°С состоянии, ежедневно добавляя порядка 10% свежего компаунда из-за нарастания вязкости.

3. КП-303Н – можно применять без подогрева, поскольку качественные характеристики системы изоляции на его основе позволяют классифицировать его по классу нагревостойкости 204°С в течение 20 тыс. часов и по классу нагревостойкости H (180°С) в течении 50 тыс. часов при напряжениях сети свыше 10 кВ, т. е. для систем изоляции высоковольтных электрических машин.

4. В лабораторных условиях при температуре запечки 160°С для всех трех компаундов, т. е. Элпласт-180ИД, ПК-11 и КП-303Н, время полного отверждения составляет, мин:

- 1) Элпласт-180ИД – 80;
- 2) ПК-11 – 30;
- 3) КП-303Н – 30.

В промышленных условиях было определено оптимальное время запечки якорей тягового двигателя для систем изоляции на основе:

- 1) Элпласта-180 ИД – не менее 16 ч при $T = 160^{\circ}C$;
- 2) ПК-11 – не менее 16 ч при $T = 160^{\circ}C$;
- 3) КП-303Н – не менее 10 ч при $T = 160^{\circ}C$.

Аллергенность пропиточных составов и ЭИМ с их использованием во многом зависит от их химической структуры и в настоящее время установлено, что наличие свободных эпоксидных групп или изоциануратимидных групп в пропиточном составе определяет и степень его аллергенности.

В **ПК-11** наличие свободных эпоксидных групп на единицу объема пропиточного состава составляет свыше 10%.

В **Элпласт-180** эпоксидные группы отсутствуют, но имеются изоциануратимидные звенья, вызывающие еще больший эффект аллергенности.

В **КП-303Н** наличие свободных эпоксидных групп на единицу объема состава составляет не более 0,1%, т. е. в 100 раз меньше, чем в ПК-11, а изоциануратимидных нет. Наблюдения в процессе промышленных работ подтверждают вышеизложенное, и проведенные ФГУП "Стандартинформ" испытания позволили внести в Регистр соответствующий паспорт безопасности вещества для КП-303Н.

Таким образом, анализ критериев надежности работы и технико-экономических характеристик диэлектриков при условии класса нагревостой-

кости Н (180°C) и скачков напряжения до 10 кВ привел к выбору оптимального варианта системы изоляции на базе пропиточного состава КП-303Н.

Диэлектрические потери при данных условиях системы изоляции на основе ЛСП-Н-ТПл и КП-303Н остаются на уровне, не превышающем 30%, уровень сопротивления изоляции не менее 10^{11} Ом, электрическая прочность практически сохраняется не ниже 20 кВ/мм.

Учитывая, положительный опыт внедрения системы изоляции с классом нагревостойкости Н на ЛСП-Н-ТПл и КП-303Н на Казахских железных дорогах (ТОО "КАМКОР-Менеджмент") и то, что новые ТЭД СТК-810 и ДТК-800 изго-

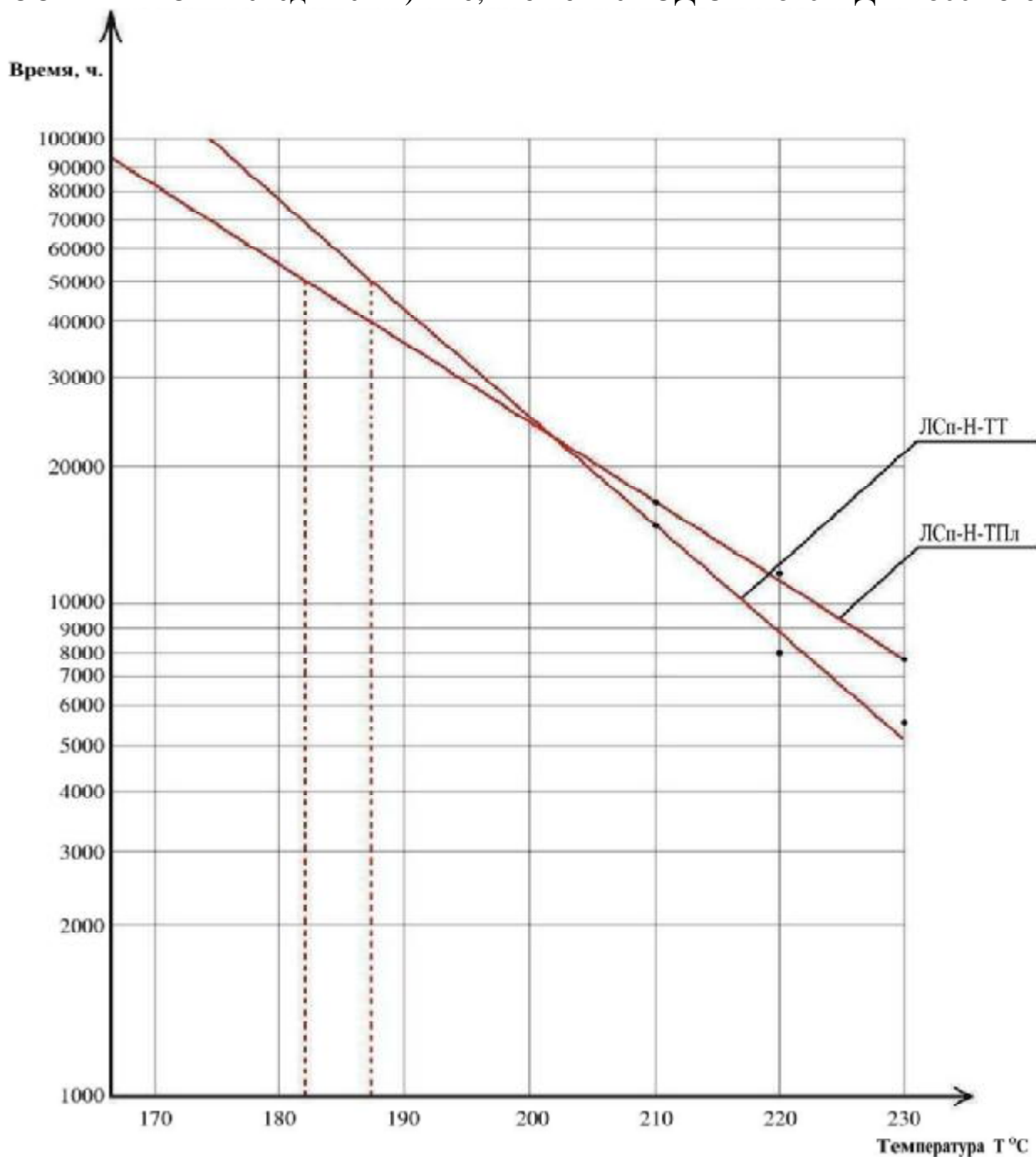


Рис. 6. Срок службы изоляции на основе Лсп-Н-ТПл(ТТ) и КП-303Н (потери электрической прочности не более 50% при выбранной рабочей температуре)

товленные с системой изоляции на основе КП-303Н и стеклослюдолент ЛСП-Н-ТПл Смелянским электромеханическим заводом (ОАО НПП "СЭМЗ") для новых уральских электровазов (грузового 2ЭС6 и пассажирского ЭП2К) выдержали все сертификационные и эксплуатационные испытания, в том числе климатические и вибропрочностные (протокол сертификационных испытаний СТК-81091 код ОКП 335511 от 09.07.2009 г. №70 [7], протокол сертификационных испытаний ДТК-800 КСУ1 код ОКП 335511 от 23.04.2008г. № ЭМ-11С-2008) [8]). Данный вариант системы изоляции следует считать **оптимальным**, он заслуживает внимания и внедрения. Проведенные макетные испытания электроизоляционных лент ЛСП-Н испытательным центром ЗАО "ВНИПТИ ОАО АЭК "Динамо" на определение нагревостойкости (рис. 6) показали, что при базовом сроке службы 50000 ч. температурный индекс составляет (180-190)°С (Протокол ДЖТИ 520.095.056) [6]).

Список литературы

1. Теоретические лекционные материалы кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов Московского Энергетического Института.
2. ГОСТ 64334-71.
3. ГОСТ 30236-94.
4. ГОСТ 30256-94.
5. ГОСТ 13526-89.
6. Протокол ДЖТИ 520.095.056.
7. Протокол сертификационных испытаний СТК-81091 код ОКП 335511 от 09.07.2009г №70.
8. Протокол сертификационных испытаний ДТК-800 КСУ1 код ОКП 335511 от 23.04.2008г. № ЭМ-11С-2008.

Рекомендовано до друку: доцентом Головченко А.С.