



УДК 621.314:621.315.614.6

## СТЕПЕНЬ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В.К. Козлов, А.Х. Сабитов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
sabitov\_ah@mail.ru

**Резюме:** В статье представлены результаты исследований и анализа литературных данных термического старения бумажной изоляции. Установлено экспоненциальное снижение степени полимеризации бумажной изоляции от времени старения: в начальный момент времени скорость старения бумажной изоляции максимальна, затем происходит ее замедление. Выявлено, что степень полимеризации в начальный момент эксплуатации трансформатора может находиться в пределах 900 единиц, это обусловлено его сушкой в процессе изготовления.

**Ключевые слова:** степень полимеризации, единица, сушка, старение, бумажная изоляция.

**DOI:** 10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-34-38

**Для цитирования:** Козлов В.К., Сабитов А.Х. Степень полимеризации бумажной изоляции силовых трансформаторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 34-38. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-34-38.

## THE DEGREE OF POLYMERIZATION OF POWER TRANSFORMERS' PAPER INSULATION

V.K. Kozlov, A. Kh. Sabitov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
sabitov\_ah@mail.ru

**Abstract:** The paper presents the results of research and analysis of literature data on the paper insulation's thermal aging. An exponential decrease in the degree of polymerization of paper insulation from the aging time is established, at the starting time of transformers' operation the aging rate of paper insulation is maximal and after that its slowing down. It was found out that the degree of polymerization at the starting time of the transformer's operation can be in the range of 900 units, this is due to its drying during the manufacturing process.

**Key words:** degree of polymerization, unit, drying, aging, paper insulation.

**For citation:** V.K. Kozlov, A. Kh. Sabitov The degree of polymerization of power transformers paper insulation // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 34-38. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-34-38.

Срок службы изоляционной системы трансформаторов определяется сроком службы бумажной изоляции, который, в основном, рассчитывается в результате определения степени полимеризации. Согласно СТО 34.01-23.1-001-2017 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» для оценки состояния бумажной изоляции требуется проводить исследование растворенных в масле фурановых соединений РД 34.43.206-94, а также определять степень полимеризации бумаги. Существующие химические методы определения степени полимеризации бумаги предусматривают отбор образца изоляции с последующим его исследованием в химической лаборатории согласно "Методическим указаниям по оценке состояния бумажной изоляции обмоток силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов по степени полимеризации" (утверждены РАО "ЕЭС России" от 13.12.2007г.) в Российской Федерации и МЭК 60450 – в мире. В соответствии с требованиями СТО 56947007-29.180.091-2011 ОАО «ФСК ЕЭС» степень полимеризации исходной намоточной бумаги обмоток должна быть не менее 1250 единиц. У ответственных трансформаторов напряжением 35 кВ и выше, отработавших установленные нормативно-технической документацией сроки (блочных трансформаторов, трансформаторов собственных нужд), оценка состояния бумажной изоляции обмоток по степени полимеризации и определение фурановых соединений проводится при комплексных диагностических обследованиях. При нормальном состоянии изоляции степень полимеризации находится в пределах 800–600 единиц [1, 2]. Ресурс бумажной изоляции обмоток считается исчерпанным при снижении степени полимеризации бумаги до 250 единиц и менее. Опыт эксплуатационных организаций показывает, что коэффициент полимеризации порядка 200 соответствует непригодной к работе изоляции. Новая изоляция имеет коэффициент полимеризации порядка 1000–1200 [1].

Проведенные в работах [3, 4] теоретические исследования разложения маслопропитанной целлюлозной электротехнической изоляции позволили дать объяснение замедлению процесса старения со временем. В первоначальный момент старения в бумажной изоляции снижение степени полимеризации происходит резко, далее скорость процесса уменьшается. Снижение средней степени полимеризации макромолекул целлюлозы происходит тем интенсивнее, чем выше температура [3]. Зависимость средней степени полимеризации макромолекул целлюлозы от времени старения [5] показывает, что за первые двое суток степень полимеризации уменьшается с 900 до 400, а за последующие 16 суток – лишь с 400 до 200.

Для исследования нами была использована бумажная изоляция. Для ускорения процесса старения 80 листов этой бумаги прогревались при температуре  $80 \pm 15$  °С в атмосферных условиях. Через каждый час вынималось по 5 листов бумаги. Таким образом было получено 8 групп образцов с выдержкой в печи от 0 до 8 часов. Далее химическим методом определяли их степень полимеризации. Результаты исследований представлены в таблице.

Таблица

Степень полимеризации и время старения 8 образцов бумажной изоляции

№ образца	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Время старения, ч	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Степень полимеризации, ед.	584	524	441	417	410	328	282	272	223

По полученным значениям построили график изменения степени полимеризации бумажной изоляции от времени старения.

Полученная зависимость подтверждает экспоненциальное изменение степени полимеризации бумажной изоляции и подтверждает результаты ранее проведенных

исследований [5, 6]. Экспоненциальное снижение степени полимеризации при температурном старении подтверждается и зарубежными исследователями [7].

Согласно ГОСТ 14209-97 температура наиболее нагретой точки обмотки соответствует 98 °С. При превышении этого значения интенсивность изменения температуры подчиняется известному, как 6-градусное, правилу: увеличение температуры изоляции на 6 °С сокращает срок ее службы вдвое [8, 9].

На отечественных трансформаторных заводах для сушки активной части силовых трансформаторов 35–110 кВ используются как метод сушки горячим воздухом, так и сушка в парах нефтепродуктов.

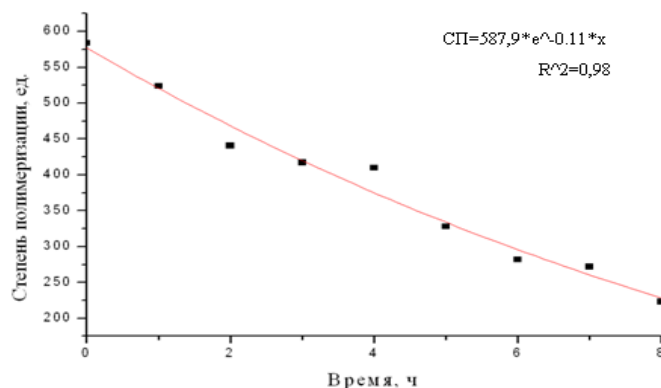


Рис. Изменение степени полимеризации бумажной изоляции от времени старения

Несмотря на утверждение, что степень полимеризации бумажной изоляции в первоначальном состоянии находится в пределах от 1000 до 1250 единиц, с учетом последних требований эксплуатирующих организаций, следует обратить внимание на технологический процесс сушки активной части трансформаторов. Сушку изоляции производят во время изготовления трансформаторов, после ремонтных работ со вскрытием и при увлажнении изоляции трансформаторного оборудования.

Сушка активной части трансформаторов в паровой фазе с использованием насыщенных паров нефтепродуктов в качестве нагревающей среды позволяет быстрее прогреть изоляцию, особенно внутренние ее части, так как на нагревание идет не только тепло самих паров, но и теплота, выделяющаяся при конденсации углеводорода типа керосина. При сушке не происходит окисление изоляции (так как нагрев осуществляется парами органической жидкости), поэтому температура сушки может быть повышена до 135 °С без опасения порчи изоляции [10].

Расчетное значение степени полимеризации образцов бумаги снижается с начального значения 1000 до 200 при температуре 130 °С в течение 4 лет, при температуре 100 °С – в течение 20 лет; при температуре 80 °С старение в течение 50 лет вызывает снижение степени полимеризации до 360, т. е. изоляция остается работоспособной.

Результаты наших исследований свидетельствуют о том, что при термической обработке бумажной изоляции происходит резкое снижение степени полимеризации. Это подтверждает факт того, что на начальном этапе эксплуатации степень полимеризации бумажной изоляции трансформатора не может сохраняться до 1250 единиц. Согласно проведенному анализу можно констатировать, что исходное значение степени полимеризации бумажной изоляции после сушки трансформатора будет находиться в пределах 900 единиц.

### Выводы

1. Проведен анализ результатов исследований различных авторов по снижению степени полимеризации бумажной изоляции при термическом старении.
2. Выявлен факт экспоненциального снижения степени полимеризации бумажной изоляции.
3. Степень полимеризации бумажной изоляции при существующем технологическом процессе изготовления и запуска в эксплуатацию трансформаторов не может составлять 1000 – 1250 единиц, его значение может находиться в пределах 900 единиц.

### Литература

1. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. М.: ЭНАС, 2002.
2. Ершов Б.Г. Измерение степени полимеризации бумажной изоляции силового оборудования в электроэнергетике и электроэнергетической промышленности / Б.Г. Ершов, В.Б. Комаров, Е.О. Лютько // Измерения в современном мире – 2013: сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2013. С. 21–24.
3. Аракелян В.Г. Химия, механизмы и кинетика старения целлюлозных материалов. Часть I. Химия, механизмы и кинетика разложения целлюлозы // Электротехника. 2006. № 6. С. 29–38.
4. Козлов В.К., Сабитов А.Х., Низамутдинов Б.Р. Исследование процесса старения бумажно-масляной изоляции в видимом диапазоне / В.К. Козлов, А.Х. Сабитов, Б.Р. Низамутдинов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 3-4. С. 81–85.
5. Маслякова А.В. Повышение электрофизических характеристик и устойчивости к термостарению целлюлозосодержащего диэлектрика путем его модификации хитозаном: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02/ Маслякова Анна Вячеславовна. СПб., 2005. 204 с. [Электронный ресурс] /Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-elektrofizicheskikh-kharakteristik-i-ustoichivosti-k-termostareniyu-tsellyulozoso> [Дата последнего обращения 1.12.17].
6. Дарьян Л.А. Маркеры старения бумажной изоляции. Корреляция степени полимеризации бумажной изоляции с концентрацией метанола в трансформаторном масле [Электронный ресурс] / Л.А. Дарьян // III Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния оборудования объектов энергетики». 2016. С.15. Режим доступа: [http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/11.\\_Darjan\\_L.A.\\_Markery\\_starenija\\_bumazhnoi\\_izoljacii.pdf](http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/11._Darjan_L.A._Markery_starenija_bumazhnoi_izoljacii.pdf). [Дата последнего обращения 4.12.17].
7. Mehta A.K., Sharma R.N., Chauhan S. Thermal aging of solid insulation under dual temperature variation. // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 06.12.2016 [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-16-24-6/elk-24-6-50-1411-23.pdf> [Дата последнего обращения 2.12.17].
8. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. М.:Энергоатомиздат, 1986.
9. Осотов В.Н. Практические аспекты оценки фактического срока службы силовых трансформаторов [Электронный ресурс] / В.Н. Осотов // III Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния оборудования объектов энергетики». 2016. С. 49. Режим доступа: [http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15.\\_Osotov\\_V.N.\\_Prakticheskie\\_aspekty\\_ocenki\\_sroka\\_sluzhby\\_transformatorov.pdf](http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15._Osotov_V.N._Prakticheskie_aspekty_ocenki_sroka_sluzhby_transformatorov.pdf) [Дата последнего обращения 4.12.17].
10. Сушка активной части [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://silovoytransformator.ru/stati/sushka-aktivnoy-chasti.htm> [Дата последнего обращения 4.12.17].

### Авторы публикации

**Козлов Владимир Константинович** – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Сабитов Айдар Хайдарович** – магистр техники и технологии, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

### References

1. Alekseev B.A. The monitoring of the status (diagnostics) of large power transformers. М.: ENAS, 2002.
2. Ershov B.G. Measurement of polymerization's degree of power equipment's paper insulation in the electrical power engineering and electric power industry / B.G. Ershov V.B., Komarov, E.O. Lyutko // Measurements in the modern world - 2013: a collection of scientific papers of the 4th International Scientific and Practical Conference. St. Petersburg.: Publishing house Polytechnic. University, 2013. P. 21–24.
3. Arakelyan V.G. Chemistry, mechanisms and kinetics of aging of cellulosic materials. Part I. Chemistry, mechanisms and kinetics of cellulose decomposition // Electrical Engineering. 2006. № 6. P. 29–38.
4. Kozlov V.K, Sabitov A.Kh., Nizamutdinov B.R. Research of aging process of paper-oil insulation in the visible range / V.K. Kozlov, A.Kh. Sabitov, B.R. Nizamutdinov // News of higher educational institutions. Problems of energy. 2015. № 3-4. P. 81–85.
5. Maslyakova A.V. Increase of electrophysical characteristics and stability to thermo-aging of cellulose-containing dielectric by its modification with chitosan: dis. Cand. ... tech. Sciences: 05.09.02 / Maslyakova Anna Vyacheslavovna. St. Petersburg, 2005. 204 with. [Electronic resource] / Access mode: <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-elektrofizicheskikh-kharakteristik-i-ustoichivosti-k-termostareniyu-tsellyulozoso> [Last references 1.12.17].
6. Dar'yan L.A. Aging's markers of paper insulation. Correlation of polymerization's degree of paper insulation with the concentration of methanol in transformer oil [Electronic resource] / L.A. Dar'yan // III Scientific-practical conference "Control of equipment's technical condition of power energy's objects". 2016. P. 15. Access mode: [http://www.ties.ru/fileadmin/f/Conference/2016/11.\\_Darjan\\_L.A.\\_Markery\\_stareniya\\_bumazhnoi\\_izoljacji.pdf](http://www.ties.ru/fileadmin/f/Conference/2016/11._Darjan_L.A._Markery_stareniya_bumazhnoi_izoljacji.pdf) [Last references 4.12.17].
7. Mehta A.K., Sharma R.N., Chauhan S. Thermal aging of solid insulation under dual temperature variation. // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 06.12.2016 [Electronic resource] / Access mode: <http://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-16-24-6/elk-24-6-50-1411-23.pdf> [Last references 2.12.17].
8. Neklepaev B.N. Electric part of power stations and substations. М.: Energoatomizdat, 1986.
9. Osotov V.N. Practical aspects of the evaluation of power transformers' actual service life [Electronic resource] / V.N. Osotov // III Scientific and Practical Conference "Control of equipment's technical condition of power energy's objects". 2016. P. 49. Access mode: [http://www.ties.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15.\\_Osotov\\_V.N.\\_Prakticheskie\\_aspekty\\_ocenki\\_sroka\\_sluzhby\\_transformatorov.pdf](http://www.ties.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15._Osotov_V.N._Prakticheskie_aspekty_ocenki_sroka_sluzhby_transformatorov.pdf) [Last references 4.12.17].
10. Drying the active part [Electronic resource] / Access mode: <http://silovoytransformator.ru/stati/sushka-aktivnoy-chasti.htm> [Last references 4.12.17].

### Authors of the publication

**Vladimir K Kozlov** – Doc. Sci. (physical&mathematical), Prof., department «Electric power systems and grids», Kazan State Power Engineering University.

**Aidar K Sabitov** – master of engineering and technology, senior lecturer «Electric power systems and grids », Kazan State Power Engineering University.

*Поступила в редакцию*

*06 марта 2018 г.*