

УДК 621.315.3: 621.316.99

**М.Н. Дубяго, В.Х. Пшихопов, Н.К. Полуянович****ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ\***

*Актуальность работы заключается в том, что надежность и бесперебойность работы силовых кабельных линий (СКЛ) сильно зависят от температурного режима работы линии и внешних условий. Особенно это проявляется при эксплуатации в климатических условиях нашей страны, в которых тепловые свойства изоляции существенно меняются в зависимости от сезона. В процессе работы под нагрузкой происходит нагрев СКЛ из-за потерь активной мощности в жиле и изоляционных элементах. Если температура жилы приближается к максимально допустимой, то начинается процесс интенсивного теплового износа, ее тепловое старение и пробой изоляции. Именно этот показатель надежности явился предметом исследования в данной работе. Ресурс электрической изоляции определяет фактическую наработку кабеля, а срок службы характеризует календарное время с момента ввода кабеля в эксплуатацию независимо от наработки и коэффициента нагрузки. Таким образом, в статье рассматривается проблема оценки и прогнозирования остаточного ресурса кабельных систем электроснабжения, в условиях воздействия тепловых режимов эксплуатации. Для достижения цели поставлены следующие задачи: – установить влияние температурного режима работы линии, внешних эксплуатационных факторов и режимов работы на изоляционные свойства СКЛ; – на основе математической модели старения и выявленных изменений свойств изоляции от эксплуатационных факторов предложить методику оценки ресурса СКЛ. Показано, что оценка израсходованного и остаточного ресурса изоляции может быть получена по результатам измерений параметров изоляции в зависимости от эксплуатационных параметров с использованием математической модели старения. Получены и построены зависимости функции старения от температуры и времени, построенные при различных параметрах распределения Вейбулла. Изоляционные материалы; ресурс; неразрушающая диагностика; прогнозирование.*

**M.N. Dubyago, V.Kh. Pshikhopov, N.K. Poluyanovich****ASSESSMENT AND FORECASTING THE INSULATION OF POWER CABLE LINES**

*Relevance of the work lies in the fact that the reliability and continuity of power cable lines (PCL) is strongly dependent on the temperature of the line and the external environment. This is particularly evident in the operation in the climatic conditions of the country in which the thermal insulation properties vary significantly depending on the season. In operation, the heating occurs under load due to the PCL active power losses in the conductor and the insulation element. If the core temperature approaches the maximum, then begins the process of intensive thermal wear, aging and its thermal insulation breakdown. This indicator reliability has been the subject of study in this work. Resource electrical insulation of the cable determines the actual operating time and lifespan characterizes the calendar time from the date of putting into operation regardless of operating time and load factor. Thus, in the article the problem of assessment and prediction of residual life of cable systems of power supply, in conditions of thermal modes of operation. To achieve the goal the following objectives: – to establish the effect of temperature of the line, external factors and operational modes on the insulating properties of the PCL; – on the basis of a mathematical model of aging and identified changes in the properties of isolation from operational factors suggest a methodology to assess resource PCL. It is shown that the evaluation of the used and residual life of the insulation can be obtained from measurements of the insulation, depending on the operating parameters using a mathematical model of aging. We obtained and constructed according to the function of the aging time and temperature, built at various parameters of the Weibull distribution.*

*Insulating materials; resources; non-invasive diagnosis; forecasting.*

---

\* Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, НИР № 114041540005.

**Введение.** Техническое состояние СКЛ возможно определить методами технической диагностики [1–4]. Эти методы позволяют локализовать проблемные места в изоляции, определить степень их опасности, оценить остаточный ресурс эксплуатации линий и необходимые материальные ресурсы для их восстановления до требуемых параметров. Диагностические методы контроля технического состояния объектов электроэнергетики, являются не разрушаемыми технологиями [5–12] и относятся к числу многофакторных наукоемких технологий, прежде всего по причине сложного анализа результатов диагностических исследований.

**Оценка состояния СКЛ.** Проведена диагностика СКЛ на предприятиях Ростовской области, табл. 1, с помощью лаборатории фирмы SebaKMT, включающей в себя два вида приборов: OWTS и CDS [13, 14].

Таблица 1

Обследование технического состояния СКЛ

Кабельная система	Измерение уровня ЧР (OWTS M28)		Рекомендации		Измерение $I_{\text{пол.}} \cdot U_{\text{пол.}}$ (Обследования CDS)				Рекомендации по тех. обслуживанию	
	PDVI кВ	q, пКл	Состояние изоляции	Ремонт в течении	R	Q	Степень увлажнения	Степень старения изоляции	Состояние	Диагностирование
РП-1 до ТП-149	4,0	1540	Неуд	1-года	0,279	1,742	Влажная	Сильно состарена	Неудов	Через 1-год
ТП-173 до ТП-174	4,0	4730	Неуд	1-года	0,18	1,704	Влажная	Сильно состарена	Неудов	Через 1-год
ТП-36 до ТП-6	6,0	1162	Неуд	1-года	0,214	1,715	Влажная	Средняя	Удовлетворит	Через 5-лет
ТП-149 до ТП-36	6,0	972	Удов	1-года	0,164	1,733	Высокая влажность	Высокая	Неудов	Через 1-год
ТП-36-ТП905	2,0	12174	Предпробное	1-месяца	0,934	1,377	Очень высокая (сырой)	Сильно состарена	Предпробное	В течен 1-мес

Из таблицы видно, что кабельные системы имеют различное техническое состояние изоляции, (имеют дефекты). Техническая диагностика позволяет определять проблемы на их ранней стадии, не доводя эксплуатацию оборудования до аварийной ситуации. Анализ результатов диагностики является многофакторной задачей и потому сложной в решении [15]. В общем случае целевую функцию  $Q$  можно записать как:

$$Q = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n),$$

где  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  параметры или факторы.

В методике оценки технического состояния СКЛ по частичным разрядам (ЧР) анализируются такие параметры как: уровень, количество за единицу времени и напряжение возникновения разрядов [13, 14]. Каждый из факторов оценивается по четырем диапазонам изменения. Накануне пробоя изоляции уровень разрядов растет, а их количество уменьшается [16–20].

**Методология расчета надежности.** Вероятности  $P_F(t)$  безотказной работы и  $P_{AC}(t)$  возникновения аварийных ситуаций рассчитываются путем подстановки в соответствующие многочлены  $P_F(\{p, \dots, t\})$  и  $P_{AC}(\{p, \dots, t\})$  числовых значений вероятностей безотказной работы и/или отказа элементов  $p_i = p_i(t) \cdot q_i = 1 - p_i$ . При экспоненциальном законе распределения наработки до отказа, указанные вероятностные параметры элементов вычисляются по формулам:

$$p_i = p_i(t) = e^{-\frac{t}{T_{oi}}} \quad q_i = q_i(t) = 1 - p_i(t),$$

где  $i$  – номер элемента,  $T_{oi}$  – средняя наработка элемента до отказа,  $t$  – заданная наработка. Средняя наработка до отказа  $T_{OF}$  или аварии  $T_{OAC}$  невосстанавливаемой системы:

$$T_{OF/OAC} = \int_0^{\infty} P_{F/AC}(t) dt = \sum_{j=1}^M (3H_j) \frac{1}{\sum_{i \in K_j} \frac{1}{T_{oi}}}, \quad (2)$$

где  $M$  – число одночленов в многочлене ВФ,  $(znj)$  – знак  $j$ -го одночлена ВФ, а  $Kj$  – множество номеров элементов, параметры  $p_i(t)$  которых вошли в состав  $j$ -го одночлена вероятностной функции. Коэффициент готовности  $P_{F/AC}(t) = P_{F/AC} = K\Gamma_{F/AC}$  восстанавливаемой системы рассчитывается путем подстановки в многочлены  $P_F(\{pt, t\})$  или  $P_{AC}(\{pt, t\})$  числовых значений коэффициентов готовности  $K\Gamma$ , и коэффициентов неготовности  $1 - K\Gamma_j$ , элементов:

$$p_i = K\Gamma_i = \frac{T_{oi}}{T_{oi} + T_{bi}}; \quad q_i = 1 - K\Gamma_i,$$

где  $T_{bi}$  – среднее время восстановления элемента. Для восстанавливаемых системы [5] расчет средней наработки  $T_{OB}$  на отказ или аварийную ситуацию и среднего времени восстановления  $T_B$  осуществляется на основе формул:

$$T_{BO} = K\Gamma_{\frac{F}{AC}} \left( 1 / \sum_{i=1}^H \xi_i \frac{1}{T_{oi}} K\Gamma_i \right). \tag{1}$$

$$T_B = \left( 1 - K\Gamma_{\frac{F}{AC}} \right) \left( 1 / \sum_{i=1}^H \xi_i \frac{1}{T_{oi}} K\Gamma_i \right). \tag{2}$$

На основе оценок (1) и (2) определяется приближенное значение еще одной важной характеристики надежности восстанавливаемой системы – вероятности  $P_{BF}(t)$  ее безотказной работы в течение заданного времени  $t$ . Расчет этого показателя основывается на гипотезе о том, что распределение протяженности суммарного времени безотказной работы и последующего времени восстановления системы близко к экспоненциальному закону и может характеризоваться эквивалентной интенсивностью

$$\lambda_3 = \frac{1}{T_{OB} + T_B}. \tag{3}$$

Тогда вероятности безотказной работы и отказа, в течение времени  $t$  функционирования восстанавливаемой системы любой структуры, составят

$$P_{\frac{BF}{BAC}}(t) = e^{-\frac{t}{T_{OB} + T_B}}; \quad Q_{\frac{BF}{BAC}}(t) = 1 - P_{\frac{BF}{BAC}}(t). \tag{4}$$

**Определение срока службы изоляции от температуры.** Связь между сроком службы изоляции и рабочей температурой имеет логарифмический характер, и если по одной оси откладывать температуру в линейном масштабе, а по другой – срок службы в логарифмическом масштабе, то зависимость представляется прямой (рис. 1). Правило восьми градусов и зависимость [20] не гарантируют строго определенного срока работы.

$$D_g = A_0 2^{-g/\Delta g}, \tag{5}$$

где  $D_g$  – срок службы при  $g = const$ ;  $A_0$  – срок службы при  $g = 0$  °С. По правилу

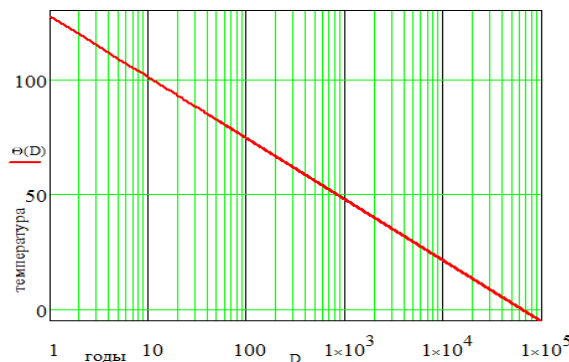


Рис. 1. Зависимость срока службы изоляции от температуры

Монтзингеру,  $\Delta\vartheta = 5 \dots 10$  °C. Пусть  $\Delta\vartheta \approx 8$  °C, тогда (5) принимает вид

$$D_g = A_0 2^{-g/g} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{8}g} = A_0 e^{-0,0866g} . \quad (6)$$

Срок службы изоляции класса А при постоянной температуре 105°C принимается примерно равным 7 годам. Тогда из (5) следует

$$A_0 = 7 \cdot 2^{\frac{105}{8}} = 6,225 \cdot 10^4 \text{ (лет)}.$$

Тогда при расчетах можно пользоваться формулой

$$D_g = 6,225 \cdot 10^4 e^{-0,0866g} . \quad (7)$$

Обратная зависимость срока службы изоляции от температуры.

$$g(D) = 105 - 8 \cdot \log_2(D/7) . \quad (8)$$

Более точное определение срока службы может быть получено только из статистических данных эксплуатации электрооборудования [13]. Кратковременные перегрузки могут сильно сократить срок службы электроизоляции, так как при больших токах температура растёт весьма ощутимо [17]. Относительный износ изоляции, при изменении температуры определяется по формуле

$$V_1 = (t_1/D_{g1})100 = (100t_1/7)2^{\frac{g-105}{8}} , (\%) . \quad (9)$$

**Метод расчета.** Для описания распределения времени до пробоя, например, бумажно-масляной изоляции (БМИ) используются два параметра ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) распределения Вейбулла.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} , \quad t > 0 , \quad (10)$$

где  $t$  – время до пробоя БМИ.  $F(t)$  – вероятность отказа в момент времени  $t$ ,  $\alpha$  – масштабный параметр, а  $\beta$  – параметр формы, оба имеют положительные значения. Масштабы, формы и параметры Вейбулла для участков вероятностей отказа кривой жизни, приведены на рис. 2.

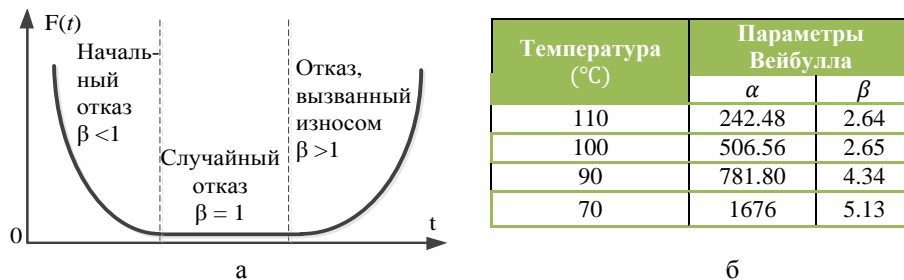


Рис. 2. а – кривая жизни, б – параметры Вейбулла

Масштабный параметр  $\alpha$  представляет время, когда вероятности отказа равна 0.632. Форма параметр  $\beta$  является показателем распространения сбоя БМИ [17]. Интенсивность отказов уменьшается, когда  $\beta < 1$ , и интенсивность отказов увеличивается при  $\beta > 1$ .

**Двухфакторная модель отказа бумажно-масляной изоляции.** Представленная ниже функция распределения Вейбулла  $F_1(T)$ , является улучшенной моделью старения и определяет вероятность отказа БМИ от температуры

$$F_1(T) = 1 - e^{-\left(3891.8 - 33.49 \cdot \frac{T}{1342.2}\right)^{1.25}} , \quad T > 0 . \quad (11)$$

В  $F_1(T)$  были использованы параметры  $\alpha = 1342,2$  и  $\beta = 1,25$ , приближенные к реальным. При тепловом и электрическом воздействии срок службы БМИ значительно уменьшается и повышается риск возникновения пробоя [17]. Однако, эта модель не может показать реальные отношения между вероятностью отказа и температурой старения. В обобщенной форме модель анализа состояния изоляции описывается выражениями (12, 13). Здесь  $x$ -двухфакторный параметр.

$$F(x) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_i(x)] \quad (12)$$

$$F_i(x) = 1 - e^{-(x/a_i)^{\beta_i}}, \quad (13)$$

где  $F_i(x)$  является выражением распределения вероятностей функции для двух параметров распределения Вейбулла, где  $a$  является параметром формы, а  $\beta$  – масштабный параметр. Приведенная ниже модель (14–16) может быть использована, для анализа состояния изоляции.

$$F_1(T) = 1 - e^{-\left(3891 - 33.49 \frac{T}{1342.2}\right)^{1.25}} \quad (14)$$

$$F(T) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{800.62}\right)^{1.38}}, \quad t > 0 \quad (15)$$

$$F(t, T) = 1 - F_1(T) \cdot [1 - F(t)]. \quad (16)$$

На основании выражений (14–16) получена зависимость иллюстрирующая степень износа изоляции в зависимости от температуры и времени (рис. 3). Кривые получены при различных параметрах распределения Вейбулла.

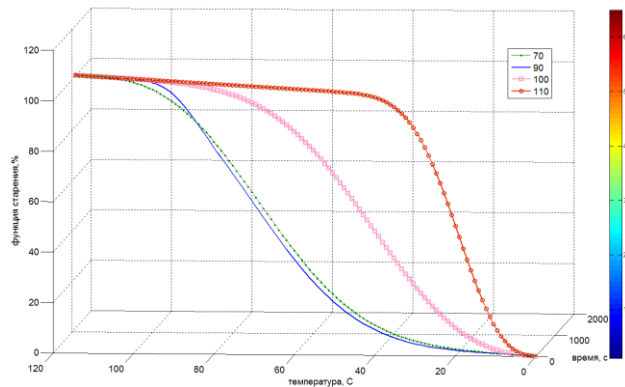


Рис. 3. Функции старения от температуры и времени

Предложенная усовершенствованная двухфакторная модель старения показывает влияние температуры на вероятность пробоя изоляции и позволяет получить более реальные вероятности отказа при комплексной оценке влияния электрического и теплового старения БМИ. Полученные результаты представляют аналитическое исследование электрического и теплового старения БМИ. Принципиальное отличие предложенной методики основывается на взаимосвязи между возникновением неисправности и повышением температуры старения, двухпараметрической модели Вейбулла.

#### Заключение.

1. Анализ результатов диагностики показывает, что кабельные системы имеют различную степень и типы технического состояния изоляции, что доказывает многофакторность решаемой задачи.

2. Двухфакторная модель старения является улучшенной моделью позволяющей оценить влияние температуры на вероятность пробоя изоляции и получить более реальные вероятности отказа при комплексной оценке влияния электрического и теплового старения БМИ.

3. Полученная зависимость между сроком службы изоляции и рабочей температурой имеет логарифмический характер.

4. При снижении температуры БМИ от 120 °C и ниже пробивной предел повышается при тех же параметрах распределения Вейбулла.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дубяго М.Н. Контроль состояния электроизоляционных систем высоковольтного оборудования под рабочим напряжением методом частичных разрядов // IX Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН: Тезисы докладов. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2012. – С. 139-140.
2. Zalizny D.I. Mathematical modeling of thermal processes in power cables with plastic isolation // The bulletin of the Gomel state technical university of P. O. Suchoj. – 2009. – No. 3.
3. Sitnikov V.F., Skopintsev V.A. Probabilistic and statistical approach to an assessment of resources of the electro network equipment in use // Electricity. – 2007. – No. 11.
4. Полюянович Н.К., Стульнева А.В., Дубяго М.Н. Автоматизированная система диагностики и контроля состояния изоляции силовых кабельных линий. Патент. БИ № 1. RU 112525. 10.01.2012.
5. Дубяго М.Н., Полюянович Н.К. Неразрушающий метод прогнозирования остаточного ресурса силовых кабельных линий // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2012. – № 1 (8). – С. 27-33.
6. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Research and Analysis of Insulating Materials of Technical Systems by Method of Partial Discharges. (AMSA) World Academic Publishing Co., Ltd.
7. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Study of characteristics of partial discharge for assessment of condition of electrical insulating materials of power supply system // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, Switzerland. – 2014. – Vol. 459. – P. 70-75.
8. Zarifian A.A., Kolpachyan P.G., Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Grebennikov N.V., Zak V.V. Evaluation of electric traction's energy efficiency by computer simulation // 2013 IMACS World Congress. 26-28, August, 2013. Barcelona.
9. Pshikhopov V.Kk., Krukhmalev V., Medvedev M.Y., and Neydorf, R. Estimation of Energy Potential for Control of Feeder of Novel Cruiser/Feeder MAAT System," SAE Technical Paper 2012-01-2099, 2012, doi:10.4271/2012-01-2099.
10. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Managing moving objects in certain and uncertain environments. – М.: Nauka, 2011. – 350 p. ISBN 978-5-02-037509-3.
11. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., and Shevchenko V. Multilevel control system of the power grid. The 2014 International Conference on Materials Science, Chemistry and Energy (ICMSCE 2014) 30- 31, August, 2014. Xi'an, China.
12. Dubyago M.N. Mathematical description of interaction of the elements in the power network system // Applied Mechanics and Materials Trans Tech Publications, Switzerland. – 2014. – Vol. 448-453. – P. 2455-2460.
13. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
14. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. The method of nondestructive testing and prediction of evolving insulation defect of power line cable // International SAUM Conference on systems, Automatic Control and Measurements. – 2012. – P. 418-422.
15. Дубяго М.Н. Разработка модели старения и определения остаточного ресурса изоляции силовых кабелей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4 (153). – С. 107-114.
16. Dubyago M.N., Poluyanovich I.A., Poluyanovich N.K. Thermodynamic Approach for Identifying oxidative processes insulation breakdown // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 752-753. – P. 1153-1157.
17. Бурьков Д.В., Дубяго М.Н., Полюянович Н.К. Оценки степени старения изоляции материалов кабелей с многослойной бумажно-пропиткой // Международное научное сотрудничество, образование и культура. – 2014. – № 3 (4). – С. 89-101.
18. Дубяго М.Н. Диагностика кабельных систем при помощи измерения частичных разрядов // Сборник научно-исследовательских работ «Наука и образование на рубеже тысячелетий». – Кисловодск, 2014. – Вып. 1. – С. 190-200.
19. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Analysis of Insulation Materials of Cable Systems by Method of Partial Discharges // Advances in Materials Science and Applications. – 2015. – Vol. 4, Issue 1. – P. 23-32.
20. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Y. Estimation and control in complex dynamic systems. Analysis of Insulation Materials of Cable Systems by Method of Partial Discharges. – М.: Physical and Mathematical Literature, 2009. – 295 p.

## REFERENCES

1. *Dubyago M.N.* Kontrol' sostoyaniya elektroizolyatsionnykh sistem vysokovol'nogo oborudovaniya pod rabochim napryazheniem metodom chastichnykh razryadov [The control of the state of insulating systems of high voltage equipment under operating voltage by the method of partial discharges], *IX Ezhegodnaya nauchnaya konferentsiya studentov i aspirantov bazovykh kafedr Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN: Tezisy dokladov* [The IX Annual scientific conference of students and postgraduate students of basic departments of the southern scientific center of RAS: Abstracts of reports]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTsRAN, 2012, pp.139-140.
2. *Zalizny D.I.* Mathematical modeling of thermal processes in power cables with plastic isolation, *The bulletin of the Gomel state technical university of P.O. Suchoj*, 2009, No. 3.
3. *Sitnikov V.F., Skopintsev V.A.* Probabilistic and statistical approach to an assessment of resources of the electro network equipment in use, *Electricity*, 2007, No. 11.
4. *Poluyanovich N.K., Stul'neva A.V., Dubyago M.N.* Avtomatizirovannaya sistema diagnostiki i kontrolya sostoyaniya izolyatsii silovykh kabel'nykh liniy [Automated system diagnostics and condition monitoring of insulation of power cable lines]. Patent. BI № 1. RU 112525. 10.01.2012.
5. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Nerazrushayushchiy metod prognozirovaniya ostatochnogo resursa silovykh kabel'nykh liniy [Non-destructive prediction method of residual life of power cable lines], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Information, Computing and Engineering Education], 2012, No. 1 (8), pp. 27-33.
6. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Research and Analysis of Insulating Materials of Technical Systems by Method of Partial Discharges. (AMSA) World Academic Publishing Co., Ltd.
7. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Study of characteristics of partial discharge for assessment of condition of electrical insulating materials of power supply system, *Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, Switzerland*, 2014, Vol. 459, pp. 70-75.
8. *Zarifian A.A., Kolpachyan P.G., Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Grebennikov N.V., Zak V.V.* Evaluation of electric traction's energy efficiency by computer simulation, *2013 IMACS World Congress. 26-28, August, 2013. Barcelona*.
9. *Pshikhopov V.Kk., Krukhmalev V., Medvedev M.Y., and Neydorf, R.* Estimation of Energy Potential for Control of Feeder of Novel Cruiser/Feeder MAAT System," SAE Technical Paper2012-01-2099, 2012, doi:10.4271/2012-01-2099.
10. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Managing moving objects in certain and uncertain environments. Moscow: Nauka, 2011, 350 p. ISBN 978-5-02-037509-3.
11. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., and Shevchenko V.* Multilevel control system of the power grid. The 2014 International Conference on Materials Science, Chemistry and Energy (ICMSCE 2014) 30- 31, August, 2014. Xi'an, China.
12. *Dubyago M.N.* Mathematical description of interaction of the elements in the power network system, *Applied Mechanics and Materials Trans Tech Publications, Switzerland*, 2014, Vol. 448-453, pp. 2455-2460.
13. *Vdoviko V.P.* Chastichnye razryady v diagnostirovanii vysokovol'nogo oborudovaniya [Partial discharges to diagnosis of high voltage equipment]. Novosibirsk: Nauka, 2007, 155 p.
14. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* The method of nondestructive testing and prediction of evolving insulation defect of power line cable, *International SAUM Conference on systems, Automatic Control and Measurements*, 2012, pp. 418-422.
15. *Dubyago M.N.* Razrabotka modeli stareniya i opredeleniya ostatochnogo resursa izolyatsii silovykh kabeley [Development of model of ageing and definition of the residual resource of isolation of power cables], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 4 (153), pp. 107-114.
16. *Dubyago M.N., Poluyanovich I.A., Poluyanovich N.K.* Thermodynamic Approach for Identifying oxidative processes insulation breakdown, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 752-753, pp. 1153-1157.
17. *Bur'kov D.V., Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Otsenki stepeni stareniya izolyatsii materialov kabeley s mnogoslnoy bumazhno-propitkoy [Assess the degree of aging of insulation materials of cables with multi-layer paper-impregnation], *Mezhdunarodnoe nauchnoe sotrudnichestvo, obrazovanie i kul'tura* [International Scientific Cooperation, Education and Culture], 2014, No. 3 (4), pp. 89-101.
18. *Dubyago M.N.* Diagnostika kabel'nykh sistem pri pomoshchi izmereniya chastichnykh razryadov [Diagnostics of cable systems through partial discharge measurements], *Sbornik nauchno-issledovatel'skikh rabot «Nauka i obrazovanie na rubezhe tysyacheletiy»* [Collection of research works "Science and education at the turn of the Millennium"]. Kislovodsk, 2014, Issue 1, pp. 190-200.

19. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Analysis of Insulation Materials of Cable Systems by Method of Partial Discharges, *Advances in Materials Science and Applications*, 2015, Vol. 4, Issue 1, pp. 23-32.
20. *Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Y.* Estimation and control in complex dynamic systems. Analysis of Insulation Materials of Cable Systems by Method of Partial Discharges. Moscow: Physical and Mathematical Literature, 2009, 295 p.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н. профессор В.Э. Бурлакова.

**Дубяго Марина Николаевна** – Южный Федеральный университет; e-mail: w\_m88@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники, аспирант.

**Пшихов Вячеслав Хасанович** – e-mail: vhpshichop@sfnedu.ru; тел.: 88634371723; д.т.н.; профессор.

**Полуянович Николай Константинович** – e-mail: nik1-58@mail.ru; тел.: 88634371694; к.т.н.; доцент.

**Dubyago Marina Nikolaevna** – Southern Federal University; e-mail: w\_m88@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; postgraduate student.

**Pshikhov Viacheslav Khasanovich** – e-mail: vhpshichop@sfnedu.ru; phone: +78634371723; dr. of eng. sc.; professor.

**Poluyanovich Nikolai Konstantinovich** – e-mail: nik1-58@mail.ru; phone: +78634371694; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 62-52:681.5

**В.Л. Заковоротный, А.Д. Лукьянов**

### **САМООРГАНИЗАЦИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С ПРОЦЕССОМ ОБРАБОТКИ**

*Рассмотрены проблемы нелинейной динамики процесса обработки материалов резанием. Предложена математическая модель динамической системы, учитывающая динамическую связь, формируемую процессом резания. Приняты во внимание следующие особенности динамической связи: зависимость сил резания от площади срезаемого слоя; запаздывание сил по отношению к упругим деформационным смещениям инструмента относительно обрабатываемой заготовки; ограничения, накладываемые на движения инструмента при сближении задней грани инструмента с обработанной частью заготовки; зависимость сил от скорости резания. Динамическая подсистема инструмента представлена линейной динамической системой в плоскости, нормальной к поверхности резания. Предлагаемая модель динамической системы является векторной, содержит два осциллятора, два источника самовозбуждения и учитывает нелинейную диссипацию. Рассмотрены общие закономерности потери устойчивости равновесия системы. Установлено, что в силу единственности решения уравнения статики, в системе при варьировании управления не наблюдается ветвление точек равновесия. Главное внимание уделено анализу формируемых в окрестности точки равновесия притягивающих множеств (орбитально асимптотически устойчивых предельных циклов, двумерных инвариантных торов и хаотических аттракторов). Приведены данные по бифуркациям системы в параметрическом пространстве и пространстве управляющих параметров как сечения бифуркационного пространства плоскостями  $(\alpha_1, \rho_0)$  и  $(\rho_0, T)$ . Установлено изменение ориентации эллипса колебаний в плоскости, нормальной к поверхности резания. Показаны переходы от двухчастотного*