

УДК 621.3:001.893

ОБНАРУЖЕНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Стругов Вячеслав Владимирович,

аспирант Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: sv_altai@sibmail.com

Лавринович Валерий Александрович,

доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: lavrhome@mail.ru

При добыче, транспортировке и переработке георесурсов используется различное электротехническое оборудование, неотъемлемой частью которого являются машины постоянного тока. Энергоэффективность и надежность производства зависит от состояния электроприводов. Выход одного двигателя может привести к остановке производственного процесса и, как следствие, повлечь за собой убытки. Одной из причин выхода из строя электродвигателей постоянного тока является повреждение изоляции из-за воздействия на нее частичных разрядов, методики обнаружения которых в двигателях постоянного тока к настоящему времени не разработано. Для своевременного предупреждения выхода из строя машин постоянного тока и снижения затрат на unplanned остановки, по замене вышедшего из строя электродвигателя, предлагается выявлять частичные разряды на ранней стадии. В области частичных разрядов проведено множество исследований, связанных с их обнаружением. Основная часть методов относится к оборудованию, работающему на переменном напряжении. Для оборудования, работающего на постоянном напряжении, надежных методов обнаружения частичных разрядов пока не разработано. Поэтому в настоящее время вопрос по диагностированию частичных разрядов в машинах постоянного тока является достаточно актуальным.

Цель работы. Создание метода для обнаружения частичных разрядов при помощи подаваемого импульсного напряжения постоянного тока на испытуемый объект.

Методы исследования. Создана физическая модель для обнаружения частичных разрядов. При помощи полученной модели и электронного осциллографа Tektronix типа TDC-2012 осуществлялась регистрация частичных разрядов для дальнейшей обработки и анализа на компьютере.

Результаты. Разработан метод по обнаружению частичных разрядов постоянным напряжением путем подачи одного короткого импульса. На созданной физической модели проведен ряд испытаний, позволивших выявить ряд неких закономерностей, на основании которых можно судить о наличии или отсутствии частичных разрядов в испытуемом объекте. По результатам работы был получен патент.

Ключевые слова:

Частичный разряд, импульсный метод, обнаружение, дефект, науглероживание, ресурсоэффективность.

Введение

Для энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе георесурсов важную роль играет состояние электротехнического оборудования. Выход из строя одного электродвигателя может привести как к дополнительным unplanned экономическим затратам, так и к затратам ресурсов. Практически в любом высоковольтном оборудовании в рабочих режимах существуют частичные разряды, однако их разрушающая способность может быть различна. Наличие дефектов в изоляции на основе полимерных материалов может приводить к возникновению частичных разрядов. Существенными факторами, определяющими эрозию диэлектрика под действием частичных разрядов, являются бомбардировка их поверхности заряженными частицами из плазмы газового разряда, химическое взаимодействие с продуктами, образующимися в разряде, а также ультрафиолетовое облучение. Роль отдельных факторов действия разряда для разных полимеров может быть различной [1].

В современных условиях, когда более 50 % силового электрооборудования объектов российской

энергетики и большинства промышленных предприятий достигло нормативного срока эксплуатации, а его обновление происходит низкими темпами, основной задачей становится продление срока службы оборудования вплоть до выработки реального, заложенного при изготовлении, ресурса [2]. Обеспечение продолжительного срока службы электрической изоляции и, как следствие, рационального использования георесурсов является важной научной и практической задачей.

Ряд авторов [3, 4] в своих трудах доказали, что разрушение изоляции происходит под действием ионизации в газовых включениях. Исходя из практики, полный пробой изоляции электрической машины возникает не сразу, ему предшествуют частичные разряды, перекрывающие часть изоляционного промежутка [5, 6]. Частичные разряды сопровождаются короткими импульсами тока и напряжения, параметры которых зависят от типа изоляции, степени ее старения, рабочего напряжения, нагрузки, температуры и др. [7, 8]. Они могут регистрироваться датчиками емкостного типа, со-

единенными с высоковольтной шиной через конденсатор связи (или его эквивалент), электромагнитными датчиками, использующими внешние антенны специальной конструкции, и акустическими датчиками, регистрирующими звуковые эффекты от частичных разрядов [9–12].

Время от возникновения первичных частичных разрядов до полного пробоя изоляции в большинстве случаев составляет от нескольких недель до нескольких лет. Поэтому параметры частичных разрядов, в особенности динамика их развития, являются важными диагностическими признаками для оценки состояния изоляции. Их фиксация дает возможность обнаруживать дефекты на ранней стадии развития, планировать и осуществлять оптимальные ремонтные работы.

Начиная с начала XX в. и по настоящее время вопрос об изучении частичных разрядов остается достаточно актуальным. Диагностику частичных разрядов в трансформаторах и машинах переменного тока оказано большое внимание множеством авторов [2, 5–16]. Обнаружению частичных разрядов в изоляции машин постоянного тока до настоящего времени не уделялось должного внимания в связи с отсутствием достоверной методики обнаружения частичных разрядов на постоянном напряжении. В связи с наличием огромного парка машин постоянного тока, например на объектах железной дороги, стоит острая проблема их обнаружения в оборудовании с большим сроком эксплуатации.

Физическая модель

На ранее запатентованном устройстве обнаружения частичных разрядов, представленном на рис. 1, приводится блочная схема модели [17].

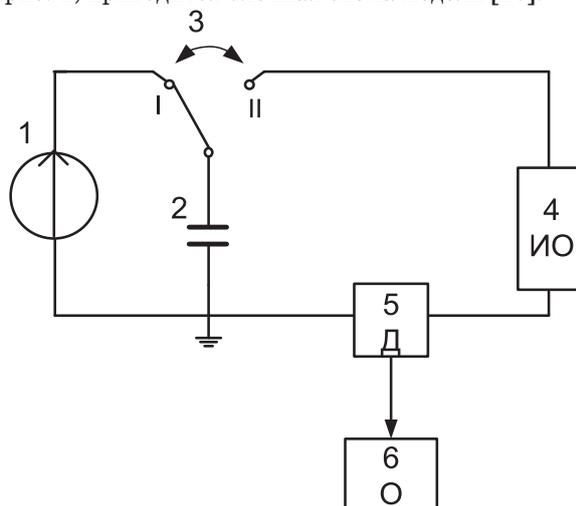


Рис. 1. Блочная схема модели: 1 – высоковольтный источник постоянного тока; 2 – высоковольтный конденсатор; 3 – ключ; 4 – испытуемый объект; 5 – датчик; 6 – осциллограф Tektronix типа TDC-2012 с полосой 100 МГц

Fig. 1. Block diagram of the model: 1 – high-voltage DC power source; 2 – high-voltage capacitor; 3 – switching key; 4 – test object; 5 – sensor; 6 – Tektronix oscilloscope type TDC-2012 with 100 MHz bandwidth

Принцип работы модели: высоковольтным источником постоянного тока, через первое положение коммутационного ключа, заряжается высоковольтный конденсатор. Далее коммутационный ключ переключается во второе положение, тем самым на испытуемый объект подается импульсное напряжение от конденсатора [17].

В ходе экспериментов, для подтверждения гипотезы, в качестве испытуемых объектов применялись разные материалы. Первым было органическое стекло с искусственным дефектом. Диаметр дефекта составлял 2 мм, максимальное напряжение, подаваемое на испытуемый объект, составило 11 кВ. В качестве датчика использовано мало индуктивное сопротивление номиналом 1 Ом. Осциллограф подключался к датчику через высоковольтный делитель напряжения марки РРЕ6KV с характеристиками: коэффициент деления 1000:1, 400 MHz, 5 MOhms/50 MOhms.

На рис. 2 и 3 приведены осциллограммы при различном импульсном напряжении. При сравнении осциллограмм видно, что при увеличении уровня подаваемого напряжения с конденсатора пропадают пиковые всплески и амплитуда напряжения уменьшается с десятков вольт до единиц. Это связано с тем, что на частичный разряд расходуется часть энергии, тем самым поглощая всплески.

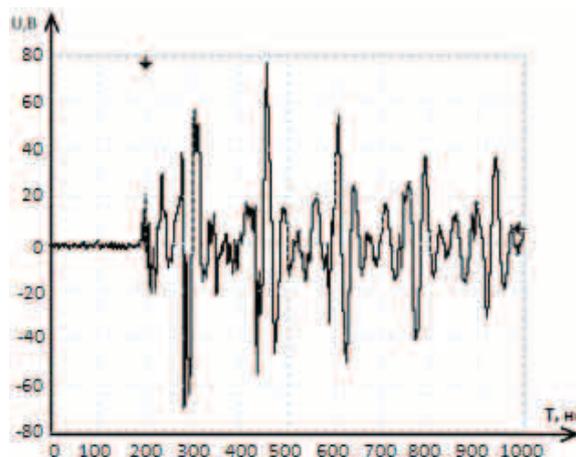


Рис. 2. Переходная характеристика при 6 кВ

Fig. 2. Transient response at 6 kV

После ряда повторений эксперимента на напряжении в 9 кВ и увеличения напряжения наблюдается увеличение амплитуды на осциллограмме (рис. 4). В дальнейшем, при проведении эксперимента на напряжении 9 кВ, характеристика не повторялась (рис. 3). Это связано с тем, что после появления частичных разрядов в искусственном дефекте на его поверхности появилось науглероживание. Условно дефект представляется емкостью, и науглероживание является шунтом. При сравнении характеристик на рис. 3–5 можно сделать вывод, что после появления частичных разрядов появилось науглероживание, которое частично зашунтировало дефект, поэтому на рис. 4 колебание немного больше, чем на рис. 3.

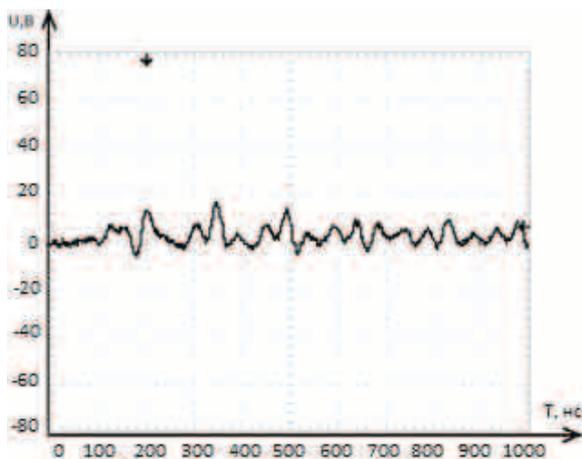


Рис. 3. Переходная характеристика при 9 кВ

Fig. 3. Transient response at 9 kV

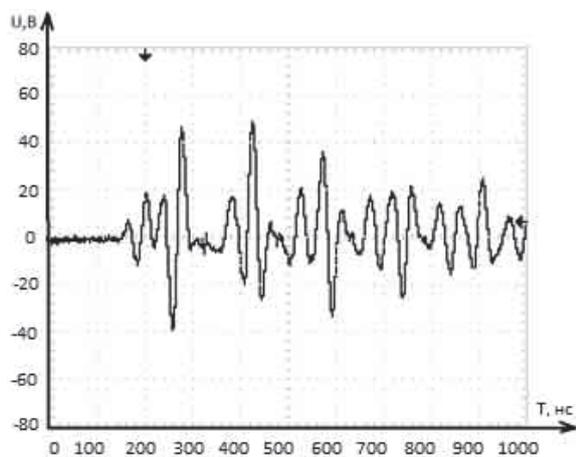


Рис. 4. Переходная характеристика при 11 кВ

Fig. 4. Transient response at 11 kV

На рис. 5 и 6 приведены фотографии дефектов до и после экспериментов соответственно. До экспериментов наглядно видно, что дефект прозрачный, а после эксперимента появилось науглероживание, что привело к помутнению дефекта [18].



Рис. 5. Искусственный дефект до эксперимента

Fig. 5. Artificial defect before the experiment



Рис. 6. Искусственный дефект после эксперимента

Fig. 6. Artificial defect after the experiment

Такой же эффект был получен при опытах с непровитанным конденсатором малой емкости (рис. 7, 8). В качестве испытуемого объекта выступали бумага и полипропиленовая пленка, являющаяся изоляцией между обкладок конденсатора. С увеличением подаваемого напряжения низкочастотная амплитуда возрастала, с появлением частичных разрядов высокочастотная составляющая исчезала. В данном опыте в качестве датчика применялся малоиндуктивный шунт с сопротивлением $11,104 \cdot 10^{-3}$ Ом, с которого передавались данные на осциллограф.

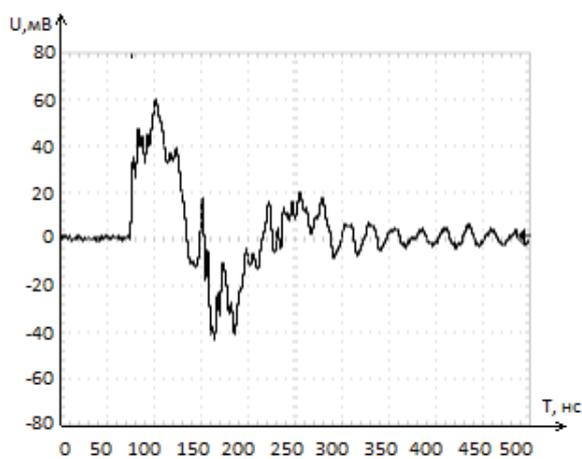


Рис. 7. Переходная характеристика при 200 В

Fig. 7. Transient response at 200 V

Иную картину можно наблюдать при испытании конденсатора емкостью 0,12 мкФ. В качестве испытуемого объекта также выступали бумага и полипропиленовая пленка, являющаяся изоляцией между обкладок конденсатора. На рис. 9 приведена характеристика сухого конденсатора с проявляющимися на ней частичными разрядами в виде высокочастотных колебаний на второй полуwave, тогда как в пропитанном конденсаторе, при том же уровне напряжения, высокочастотных колебаний нет (рис. 10). В качестве датчика также применялся малоиндуктивный шунт с сопротив-

лением $11,104 \cdot 10^{-3}$ Ом, с которого передавались данные на осциллограф.

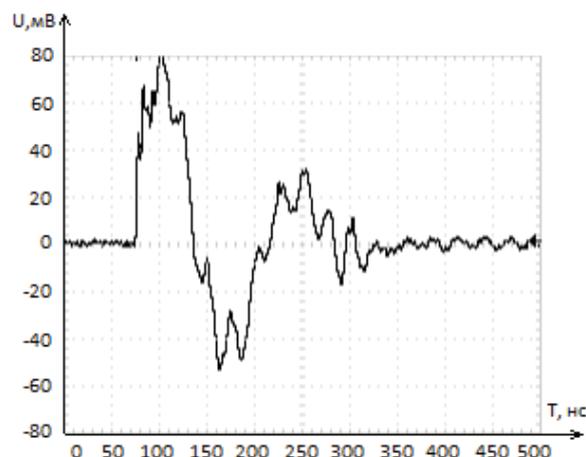


Рис. 8. Переходная характеристика при 280 В

Fig. 8. Transient response at 280 V

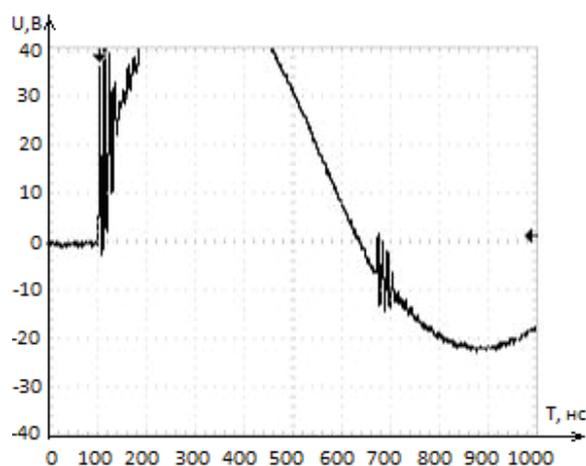


Рис. 9. Переходная характеристика при 300 В на непропитанном конденсаторе

Fig. 9. Transient response at 300 V to unimpregnated capacitor

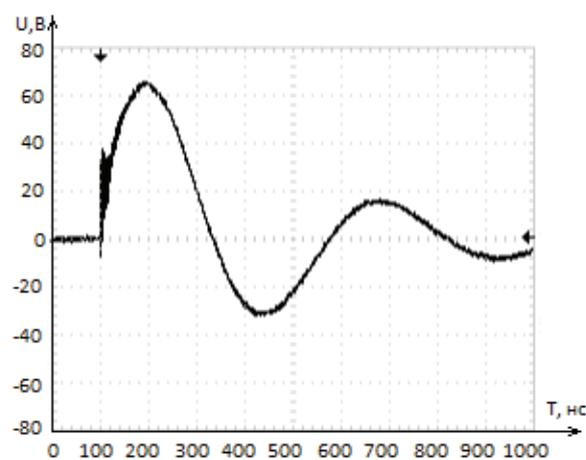


Рис. 10. Переходная характеристика при 300 В на пропитанном конденсаторе

Fig. 10. Transient response at 300 V to impregnated capacitor

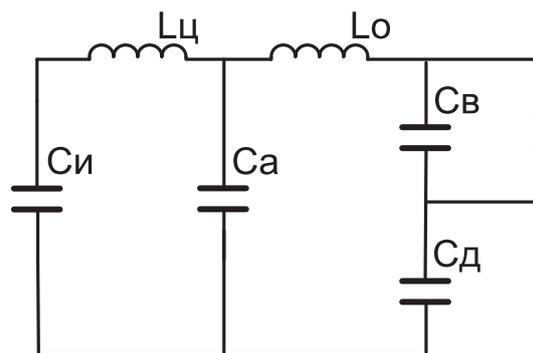


Рис. 11. Эквивалентная схема при рассмотрении частичных разрядов в диэлектрике: $C_{и}$ – емкость источника; $C_{в}$ – емкость элемента диэлектрика, участвующего в частичных разрядах (емкость включения); $C_{д}$ – емкость элемента диэлектрика, включенного последовательно с первым; $C_{а}$ – емкость остальной части диэлектрика, лишенной включений; $L_{ц}$ – индуктивность цепи; $L_{о}$ – индуктивность испытуемого объекта [19, 20]

Fig. 11. Equivalent circuit when considering partial discharges in the dielectric: $C_{и}$ – capacity of the source; $C_{в}$ – capacity of the dielectric element involved in partial discharges (switching capacity); $C_{д}$ – capacity of the dielectric element connected in series with the first; $C_{а}$ – capacity of the rest of the insulator devoid of inclusions; $L_{ц}$ – circuit inductance; $L_{о}$ – inductance of the test object [19, 20]

Данная разница в форме кривых и проявление частичных разрядов объясняется емкостью испытуемого объекта. На рис. 11 представлена эквивалентная схема при рассмотрении частичных разрядов в диэлектрике. При относительно малой емкости испытуемого объекта в момент появления частичного разряда $C_{в}$ как бы закорачивается, забирая энергию на себя, тем самым снижая высокочастотную составляющую. Тогда как при значениях $C_{а}$, значительно больших значений $C_{в}$, появление частичных разрядов, закорачивающих $C_{в}$, приводит к образованию высокочастотных колебаний.

Заключение

По созданной физической модели и разработанному методу были получены результаты на нескольких испытуемых материалах. Экспериментально установлено и на модели проверено, что параметры объекта, особенно такие как емкость объекта и индуктивность присоединительных проводников, значительно влияют на форму импульса отклика. Форма импульса-отклика при появлении частичных разрядов значительно отличается от формы импульса-отклика при их отсутствии. Это позволяет утверждать, что импульсный метод является достаточно чувствительным и с его помощью можно экспериментально обнаруживать единичные частичные разряды в твердых диэлектриках электрических машин постоянного тока. Доработка этого метода может привести к созданию новой методики обнаружения частичных разрядов импульсным методом в машинах постоянного и переменного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галичин Н.А., Борисова М.Э. Влияние частичных разрядов на спектры токов термостимулированной деполяризации // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. Физика. – 2009. – № 79. – С. 119–128.
2. Аксенов Ю.П. Мониторинг технического состояния высоковольтной изоляции электрооборудования энергетического назначения в эксплуатации и при ремонтах. – М.: Научтехлитиздат, 2002. – 338 с.
3. Mason J.H. The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges // Journal of the Institution of Electrical Engineers. – 1953. – V. 98. – P. 49–51.
4. Беркс Дж.Б., Шульман Дж.Г. Прогресс в области диэлектриков. Т. 1. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 308 с.
5. Голенко О.В., Живодерников С.В., Овсянников А.Г. Регистрация частичных разрядов в изоляции маслонаполненного оборудования // Повышение эффективности работы энергосистем: труды ИГЭУ. – 2001. – Вып. 4. – С. 303–309.
6. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
7. Аксенов Ю.П., Завидей В.И., Ярошенко И.В. Использование усовершенствованных методов электромагнитной локации разрядных явлений для определения объема ремонта трансформаторов // Электро. – 2004. – № 5. – С. 19–24.
8. Акустическая локация электрических разрядов в измерительных трансформаторах / А.П. Долин, С.К. Цветаев, Ч. Поночко, А. Поночко // Электро. – 2005. – № 2. – С. 27–31.
9. Ботяев Ю.В., Михеев А.Г., Храмов А.Н. Диагностика высоковольтного оборудования подстанции // Повышение эффективности работы энергосистем: труды ИГЭУ. – 2001. – Вып. 4. – С. 291–294.
10. Виноградова Л.В. Экспертная поддержка процессов проектирования и диагностики силовых трансформаторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: ИГЭУ, 1996. – 18 с.
11. Stone G., Kapler J. Stator winding monitoring // IEEE Ind. Applicat. Mag. – 1998. – V. 4. – P. 15–20.
12. Овсянников А.Г. Стратегия ТОиР и диагностика оборудования // Новости электротехники. – 2008. – № 2. – С. 140–142.
13. Lavrinovich V.A. Checking features of the transformer winding mechanical joint conditions by the method of low-voltage impulse // IEEE Ind. Applicat. Mag. – 2014. – V. 2. – P. 382–385.
14. Lavrinovich V.A., Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V. Development of advanced control state technology of transformer and electric motor windings based on pulsed method // International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering». – 2012. – V. 4. – P. 149–153.
15. Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of state control procedure of power transformer winding by short probe pulses // International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering». – 2014. – V. 6. – P. 145–147.
16. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse // IEEE Ind. Applicat. Mag. – 2015. – V. 22. – P. 2041–2045.
17. Устройство для обнаружения частичных разрядов: пат. Рос. Федерация № 2014106561/07; заявл. 20.02.2014; опубл. 17.03.2015, Бюл. № 16. – 6 с.
18. Стругов В.В., Лавринович В.А., Антипов С.А. Импульсный метод обнаружения частичных разрядов // Современные техника и технологии: труды XX Международной научно-практической конференции. – 2014. – Т. 1. – С. 49–50.
19. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с.
20. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007. – 41 с.

Поступила 27.10.2015 г.

UDC 621.3:001.893

DETECTION OF PARTIAL DISCHARGE IN DC MOTORS BY PULSE METHOD

Vyacheslav V. Strugov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: sv_altai@sibmail.com

Valeriy A. Lavrinovich,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lavrhome@mail.ru

In the production, transportation and processing of biological resources different electrical equipment is used, the integral part of which are DC machines. Energy efficiency and reliability of the production depends on the drives. The breakdown even of one engine may stop the production process and consequently entail losses. One reason for the failure of the DC motors is insulation damage due to exposure to partial discharge, however, a partial discharge detection technique has not been developed yet. For early warning of failure of DC machines and reducing the cost of unplanned stoppage on the replacement of a failed motor it is proposed to detect partial discharges at an early stage. There are many developments related to the detection of partial discharges. The majority of methods refer to equipment operating with AC voltage. For equipment operating at a constant voltage, reliable methods for partial discharge detection are not developed yet. Therefore, now the question of the diagnosis of partial discharge in the DC machine is quite relevant.

Objective: to provide a method for detecting the partial discharge pulse applied using the DC voltage to the test object.

Methods. A physical model for the detection of partial discharges was created. With the resulting model and electronic Tektronix oscilloscope type TDC-2012 the registration of partial discharge was carried out, for further processing and analysis on a computer.

Results. The authors developed a method for the detection of partial discharge constant voltage by applying a short pulse. A series of tests, which revealed a number of certain laws by which we can judge the presence or absence of partial discharge in the test object, were performed by means of the created physical model. The authors obtained a patent on the basis of this research.

Key words:

Partial discharge, pulse method, detection of, defect, carburizing, resource efficiency.

REFERENCES

- Galichin N.A., Borisova M.E. Vliyaniye chastichnykh razryadov na spektry tokov termostimulirovannoy depolyarizatsii [Effect of partial discharge in the spectra of thermally stimulated depolarization currents]. *Bulletin of the RSPU named after Herzen. Physics*, 2009, no. 79, pp. 119–128.
- Aksenov Yu.P. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovoltnoy izolyatsii elektrooborudovaniya energeticheskogo naznacheniya v ekspluatatsii i pri remontakh* [Monitoring of the technical condition of high voltage insulation of electrical energy destination in operation and repairs]. Moscow, Nauchtekhizdat Publ., 2002. 338 p.
- Mason J.H. The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 1953, vol. 98, pp. 49–51.
- Berx J.B., Shulman J.G. Progress v oblasti dielektrikov [Progress in the field of dielectrics]. *State Energy Publishing*, 1962, vol. 1, pp. 118–166.
- Golenko O.V., Zhivodernikov S.V., Ovsyannikov A.G. Registratsiya chastichnykh razryadov v izolyatsii maslonapolnennogo oborudovaniya [Registration of partial discharges in insulation of oil-filled equipment]. *Trudy IGEU «Povyshenie effektivnosti raboty energosistem»* [Proc. of the ISPU. Improving the efficiency of energy systems]. Ivanovo, 2001, iss. 4. pp. 303–309.
- Svi P.M. *Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniya vysokogo napryazheniya* [Methods and tools for the diagnosis of high voltage equipment]. Moscow, Energoatomizdat, 1992. 240 p.
- Aksenov Yu.P., Zavidey V.I., Yaroshenko I.V. Ispolzovanie usovershenstvovannykh metodov elektromagnitnoy lokatsii razryadnykh yavleniy dlya opredeleniya obema remonta transformatorov [Use of improved methods for electromagnetic phenomena bit locations to determine the amount of repair transformers]. *Elektro*, 2004, no. 5, pp. 19–24.
- Dolin A.P., Tsvetaev S.K., Ponocho Ch., Ponocho A. Akusticheskaya lokatsiya elektricheskikh razryadov v izmeritelnykh transformatorakh [Acoustic location of electrical discharges in instrument transformers]. *Elektro*, 2005, no. 2, pp. 27–31.
- Botyayev Yu.V., Mikheev A.G., Khramtsov A.N. Diagnostika vysokovoltnogo oborudovaniya podstantsii [Diagnosis of high-voltage substation]. *Trudy IGEU «Povyshenie effektivnosti raboty energosistem»* [Proc. of the ISPU. Improving the efficiency of energy systems]. Ivanovo, 2001, iss. 4. pp. 291–294.
- Vinogradova L.V. *Ekspertnaya podderzhka protsessov proektirovaniya i diagnostiki silovykh transformatorov*. Avtoref. Dis. Cand. nauk [Expert support of the design and diagnostics of power transformers. Author's abstract Dis. Cand.]. Ivanovo, 1996. 18 p.
- Stone G., Kapler J. Stator winding monitoring. *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 1998, vol. 4, pp. 15–20.
- Ovsyannikov A.G. Strategii TOiR i diagnostika oborudovaniya [Strategy MRO and diagnostics equipment]. *Novosti elektrotekhniki*, 2008, no. 2, pp. 140–142.
- Lavrinovich V.A. Checking features of the transformer winding mechanical joint conditions by the method of low-voltage impulse. *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 2014, vol. 2, pp. 382–385.
- Lavrinovich V.A., Lavrinovich A.V., Mytnikov A.V. Development of advanced control state technology of transformer and electric motor windings based on pulsed method. *Technical and Physical Problems of Engineering*, 2012, vol. 4, pp. 149–153.
- Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of state control procedure of power transformer winding by short probe pulses. *Technical and Physical Problems of Engineering*, 2014, vol. 6, pp. 145–147.
- Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse. *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 2015, vol. 22, pp. 2041–2045.
- Lavrinovich V.A., Strugov V.V. *Ustroystvo dlya obnaruzheniya chastichnykh razryadov* [An apparatus for partial discharge detection]. Patent RF, no. 2553281, 2015.
- Strugov V.V., Lavrinovich V.A., Antipov S.A. Impulsnyy metod obnaruzheniya chastichnykh razryadov [Pulse detection method of partial discharge]. *Trudy XX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennyye tekhnika i tekhnologii»* [Proc. 20th Int. scien.-prac. conf. Modern equipment and technology]. Tomsk, 2014, vol. 1. pp. 49–50.
- Kuchinskiy G.S. *Chastichnye razryady v vysokovoltnykh konstruktivnykh* [Partial discharges in high-voltage designs]. Leningrad, Energiya Publ., 1979. 224 p.
- Vdoviko V.P. *Chastichnye razryady v diagnostirovaniy vysokovoltnogo oborudovaniya* [Partial discharges in the diagnosis of high-voltage equipment]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2007. 41 p.

Received: 27 October 2015.