

УДК 621.3:001.893

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЯВЛЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Стругов Вячеслав Владимирович¹,
sv_altai@sibmail.com

Лавринович Валерий Александрович¹,
lavrh@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность: В большинстве производственных процессов нефтедобывающей, горнорудной, угольной и других отраслях промышленности используются электрические машины постоянного тока. Надежность их работы в значительной степени зависит от состояния изоляции, роль которой играет эмалевая изоляция обмоточных проводов и главная изоляция стержней крупных электрических машин. Дефекты изоляции приводят к неожиданным отказам в работе электрических машин и, как следствие, к аварийным ситуациям, к простоям и к высоким экономическим потерям из-за недоотпуска продукции и затрат на ликвидацию отказа машины. Причин выхода из строя электродвигателей постоянного тока достаточно много, большинство из них связано с повреждением изоляции из-за воздействия на нее частичных разрядов. Для своевременного предупреждения выхода из строя машин постоянного тока и снижения затрат на unplanned остановки, по замене вышедшего из строя электродвигателя, необходимо выявлять частичные разряды на ранней стадии, чтобы выводить оборудование в ремонт в плановом порядке. Исследованию появления и влияния частичных разрядов на изоляцию уделяется много внимания начиная с начала XX в. Основная часть исследований 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 тема выявления частичных разрядов в машинах постоянного тока является достаточно актуальной. Перспективным способом обнаружения частичных разрядов является применение импульсного метода. Метод основан на диагностике переходного процесса в системе обмотка–изоляция электрической машины при подаче высоковольтного диагностического импульса на вход обмотки машины. По отклику от диагностического импульса можно судить о наличии частичных разрядов в изоляции и уровне напряжения, при котором они возникают. Для детального понимания переходных процессов в системе обмотка–изоляция с учетом частичных разрядов требуется создание схемотехнической электрической модели, так как не все состояния обмотки можно воспроизвести в реальной изоляции машины.

Цель работы: создание электротехнической модели для демонстрации и исследования метода обнаружения частичных разрядов при помощи подаваемого импульсного напряжения на испытуемый объект.

Методы исследования: схемотехническое моделирование процессов проявления частичных разрядов, наблюдаемых в эксперименте, при помощи разработанной модели в среде Micro-Cap.

Результаты. Создана электротехническая модель экспериментальной установки, в которой искусственно и контролируемо создаются условия для возникновения частичных разрядов. Модель отображает проявление частичных разрядов идентично наблюдаемым в эксперименте. Это позволило выявить связь между формой наблюдаемых в эксперименте осциллограмм и наличием или отсутствием частичных разрядов в изоляции испытуемых объектов.

Ключевые слова:

Электродвигатель постоянного тока, частичный разряд, импульсный метод, обнаружение, дефект, науглероживание, ресурсоэффективность.

Введение

Для энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе георесурсов важную роль играет состояние электротехнического оборудования. Высокие требования к эксплуатационной надежности, простоте и безопасности обслуживания оборудования нефтегазовых промыслов предъявляют широкий ряд условий, которым должны удовлетворять электроприводы [1, 2]. Выход из строя одного электродвигателя может привести как к экономическим затратам, так и к повышенным неоправданным 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 первопричина возникновения частичных разрядов. Существенными факторами, определяющими деградацию 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 [3].

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 [4]. Обеспечение продолжительного срока службы электрической изоляции, и, как следствие, рационального использования георесурсов, является важной научной и практической задачей.

Рядом авторов [5, 6] показано, что разрушение изоляции происходит под действием ионизации в газовых включениях. Обследование электрооборудования физическими способами достаточно распространено и широко применяется. Однако эти методы позволяют лишь увидеть результат, есть или нет частичные разряды [4, 7–24]. Использование компьютерной модели позволяет, по известным параметрам, промоделировать и получить приближенную картину процессов в электрооборудовании. По модели приближенно можно оценить величину дефектов, в которых протекают частичные разряды, и составить прогноз по остаточному ресурсу.

Моделирование

Предварительными экспериментами на физической модели [25] было показано, что частичные разряды можно обнаруживать по осциллограмме тока в контуре, в котором включен испытуемый объект. Блочная схема этого эксперимента приведена на рис. 1. По результатам исследования процессов в такой схеме был получен патент на устройство обнаружения частичных разрядов [26].

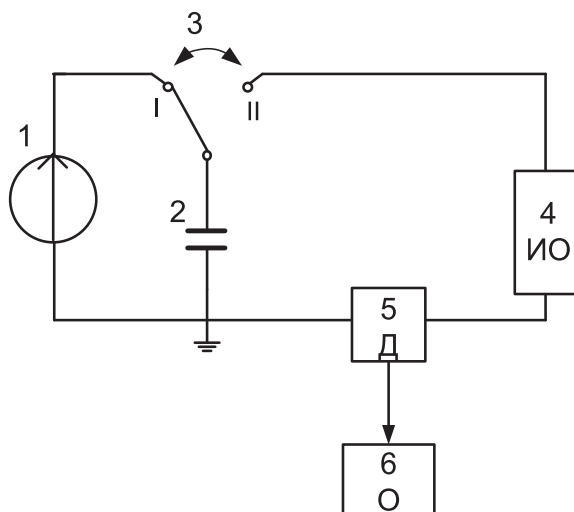


Рис. 1. Блочная схема модели: 1) высоковольтный источник постоянного тока; 2) высоковольтный конденсатор; 3) коммутационный ключ; 4) испытуемый объект; 5) датчик; 6) осциллограф Tektronix типа TDC-2012 с полосой 100 МГц

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

Принцип работы физической модели для обнаружения частичных разрядов по патенту [26] заключается в следующем: высоковольтным источником постоянного тока, через первое положение коммутационного ключа, заряжаем высоковольтный конденсатор. Далее переключаем коммутационный ключ во второе положение, тем самым подавая на испытуемый объект импульсное напряжение постоянного тока [26]. Это импульсное напряжение возбуждает емкости испытуемого объекта, и

на осциллограмме видны высокочастотные колебания тока рис. 2. При повышении напряжения на емкости – 2 в объекте могут появиться частичные разряды, которые приводят к изменению формы тока, фиксируемого с помощью шунта – 5.

В ходе экспериментов на физической модели был испытан ряд материалов с присутствующими дефектами и без них. При работе с искусственным дефектом в органическом стекле с увеличением напряжения появляются частичные разряды. На рис. 2, 3 приведены осциллограммы при различном импульсном напряжении. Сравнительный анализ показал, что увеличение уровня заряда напряжения конденсатора приводит к пропаданию выбросов на осциллограмме тока, и значение максимального выброса уменьшается с десятков вольт до единиц. Это объясняется тем, что емкость объекта мала, соответственно мала энергия, запасаемая в емкости объекта. Появление частичного разряда ведет к расходу энергии на его протекание, поэтому значимая часть энергии, запасаемая в емкости объекта, расходуется и тем самым высокочастотные всплески тока быстро затухают, что наблюдается на осциллограмме тока.

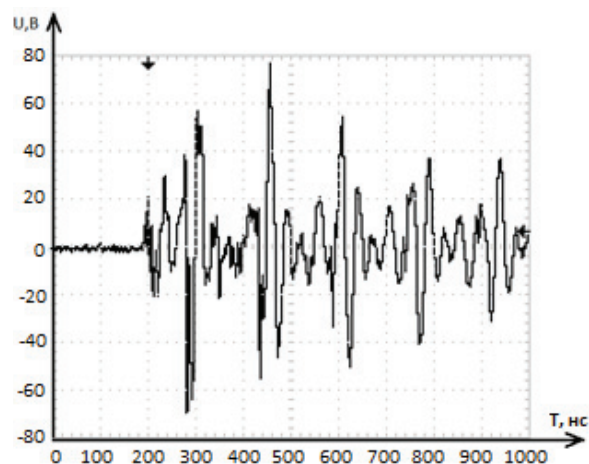


Рис. 2. Переходная характеристика при 6 кВ

Fig. 2. Transient response at 6 kV

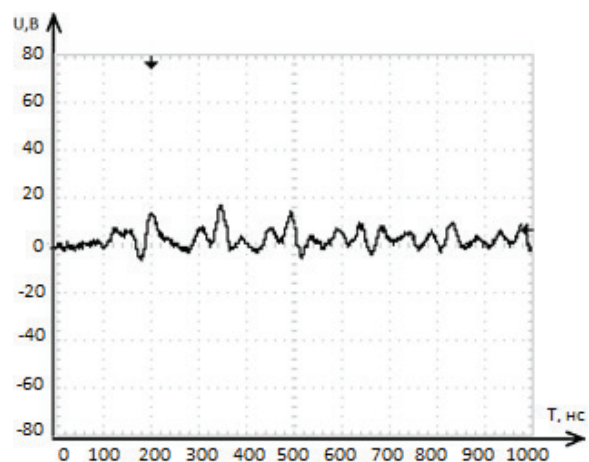


Рис. 3. Переходная характеристика при 9 кВ

Fig. 3. Transient response at 9 kV

После ряда повторений эксперимента на напряжении 9 кВ и дальнейшем увеличении напряжения характеристика, снимаемая с осциллографа, приняла вид, приведенный на рис. 4. При повторном проведении эксперимента на напряжении 9 кВ на этом же объекте вид осциллограммы, приведенной на рис. 3, не повторяется. Это объясняется тем, что после зажигания частичных разрядов в искусственном дефекте появилось науглероживание на поверхности дефекта, из-за этого частичный разряд не образуется и энергия не расходуется на дефекте. Условно вначале дефект представляется емкостью, а затем, когда науглероживается, – является активным сопротивлением, которое шунтирует емкость дефекта [25].

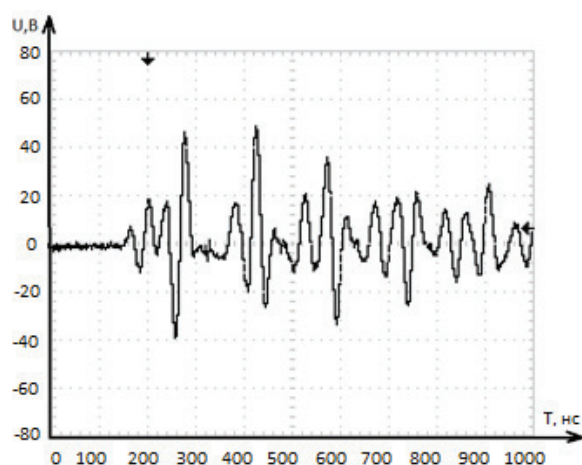


Рис. 4. Переходная характеристика при 11 кВ

Fig. 4. Transient response at 11 kV

Из этого результата следует важный вывод, что диагностику изоляции высоковольтного оборудования необходимо начинать проводить на новых изделиях и делать ее периодически на протяжении всего срока службы для своевременной и правильной оценки состояния изоляции. Если диагностику делать нерегулярно, то можно пропустить нача-

ло возникновения частичных разрядов, которые могут науглеродить возникшие в изоляции полости и зашунтировать их. Зашунтированные дефекты не будут проявляться как частичные разряды, но разрушение изоляции будет происходить за счет прорастания дефекта (дендрита) в тело изоляции, что в конечном итоге приведет к пробое изоляции, а значит неожиданному выходу из строя оборудования.

Предлагаемая методика была применена при экспериментах с конденсаторной бумагой типа КОН-2 толщиной 10 мкм. Перед проведением опытов на непропитанном конденсаторе бумага была просмотрена под электронным микроскопом. Все инородные тела были зафиксированы, после проведения испытаний по методу импульсной диагностики бумага была повторно исследована, и были выявлены новые пятна рис. 5. Появление науглероживания в местах предполагаемых дефектов, которые не были зафиксированы визуально, подтверждает появления частичного разряда в данном месте. Наблюдаемое науглероживание от протекающих частичных разрядов в данном случае имеет небольшие размеры, так как воздушные включения, обусловленные размером дефектов в бумаге, также малы. В то же время по осциллограммам возникающие частичные разряды обнаруживаются.

По параметрам одного из испытуемых объектов была создана компьютерная модель в программе Micro Cap [27], которая приведена на рис. 6. В основе модели частичного разряда лежит классическая схема замещения частичного разряда (на рис. 6 блоки Б, В и Г), описанная в работах многих авторов [28, 29]. Отличие предложенной модели частичного разряда от известных заключается в ведении управляемых напряжением ключей Vo1 и Vo2, срабатывание которых зависит от амплитуды прикладываемого напряжения, и введением в ветвь разряда частичного разряда сопротивления, которое имитирует науглероживание в месте образования частичного разряда.

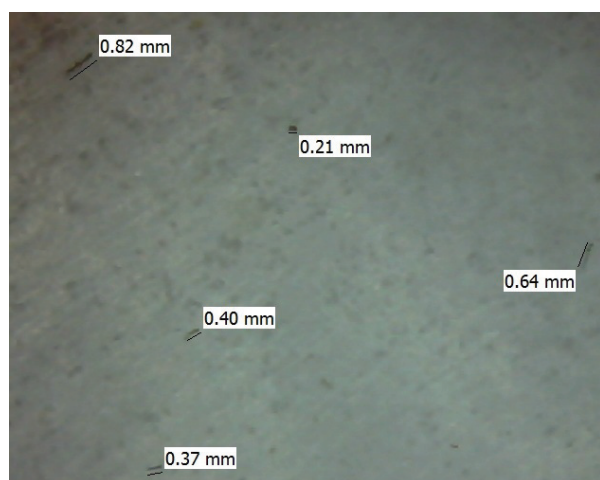
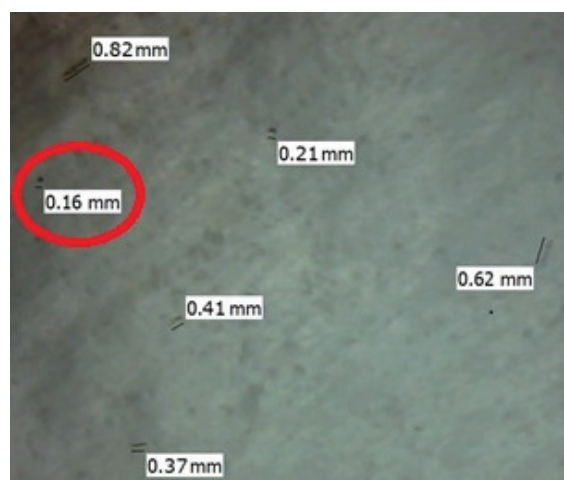


Рис. 5. Фрагмент бумаги до и после испытания

Fig. 5. Fragment of the paper before and after the test



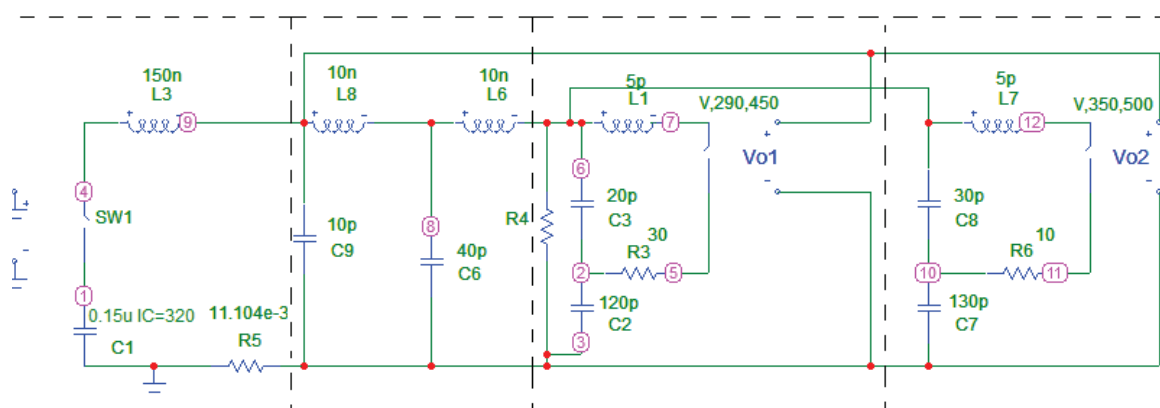


Рис. 6. Схема модели в программе Micro Cap: А) высоковольтный конденсатор, коммутационный ключ, индуктивность проводников и шунт; Б) часть объекта без дефекта; В, Г) часть с дефектом

Fig. 6. Scheme of the model in Micro Cap program: А) high-voltage capacitor, switch, inductor conductors and shunt; Б) part of the object without defect; В, Г) the part with the defect

В программе смоделирована правая часть физической модели в момент переключения коммутационного ключа. В части А, включающей в себя высоковольтный конденсатор, коммутационный ключ, индуктивность проводников, которыми подключена схема, и шунт R5, моделируется момент включения коммутационного ключа и подача напряжения от конденсатора, заряженного до определенной величины, к испытываемому объекту.

Испытуемый объект в свою очередь делится на части, включающие в себя дефекты В и Г, в которых происходят частичные разряды, и части без дефектов Б. Различие В и Г частей схемы в размерах дефектов и как следствие параметров и напряжений пробоя частичного разряда. Часть В моделирует дефекты малого размера, ключ Vo1 имеет напряжение включения 290 В. Часть Г моделирует дефекты большего размера, по сравнению с частью В, и как следствие при больших размерах требуется большее напряжение для возникновения частичного разряда, поэтому Vo2 напряжение включения составляет 350 В.

Величина емкости испытываемого объекта в физической модели составляла 90 пФ, сумма емкостей всех частей в компьютерной модели также 90 пФ. Соотношение емкостей с дефектом и без в модели также было приблизительно рассчитано по формуле (1).

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d}, \quad (1)$$

где S – площадь дефекта м^2 ; d – расстояние между пластинами м; ε_0 – электрическая постоянная Ф/м ; ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала.

Размер пятен на изоляции после испытаний составлял от единиц миллиметра до десятков миллиметра. Расчетные значения по формуле (1) получились 38 пФ. После корректировок значений емкостей для получения сходства переходных характеристик с физической моделью были получены зна-

чения для дефекта 50 пФ. Расхождения в значениях могут быть обусловлены пропуском части мелких дефектов в одной части изоляции, в бумаге, или присутствием воздушных включений рядом с полиимидной пленкой, обусловленных неплотным прилеганием.

На рис. 7–9 приведены осциллограммы с физической модели при различном импульсном напряжении. При сравнительном анализе полученных данных видно, что при увеличении уровня напряжения заряжаемого конденсатора пропадают высокочастотные всплески рис. 9. Как уже указывалось, это связано с тем, что на частичный разряд расходуется часть энергии, и тем самым снижается амплитуда колебаний напряжения и увеличиваются потери высокочастотной составляющей колебаний, остается собственное колебание контура, обусловленное его емкостью и индуктивностью.

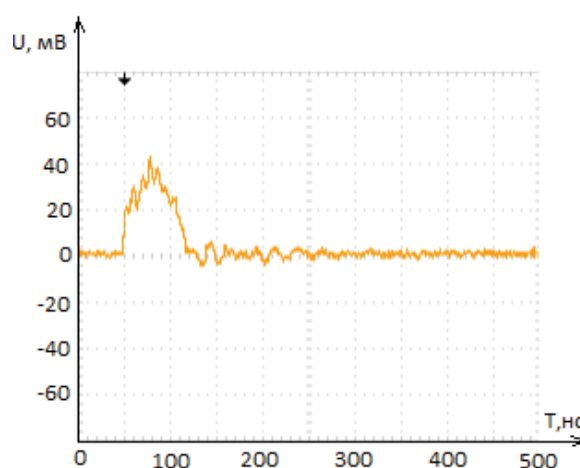


Рис. 7. Переходная характеристика при 200 В

Fig. 7. Transient response at 200 V

Моделированием в программе Micro-Cap (рис. 6) были получены переходные характеристики, приведенные на рис. 10–12.

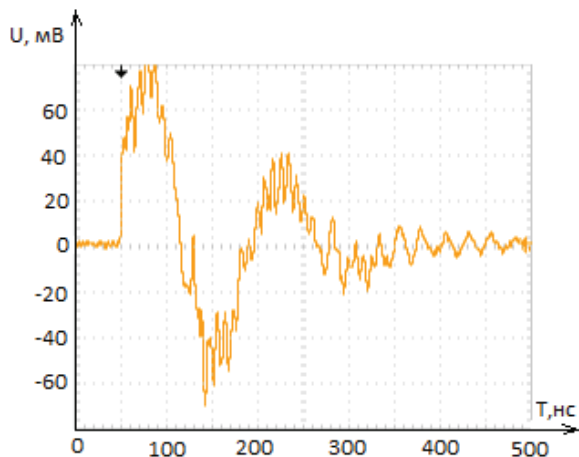


Рис. 8. Переходная характеристика при 260 В

Fig. 8. Transient response at 260 V

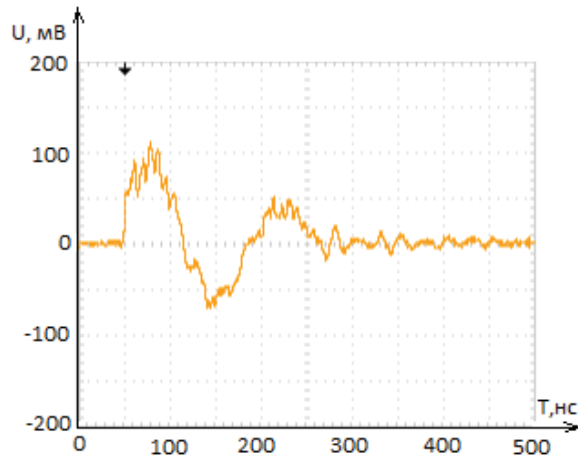


Рис. 9. Переходная характеристика при 320 В

Fig. 9. Transient response at 320 V

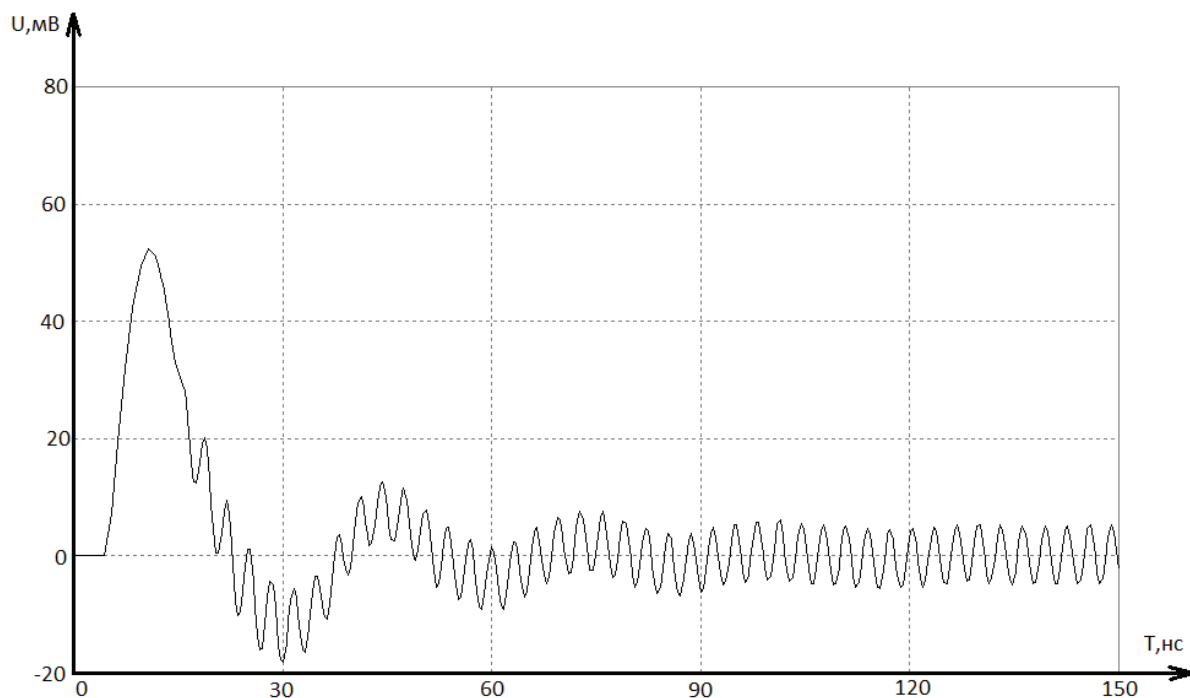


Рис. 10. Переходная характеристика при 200 В

Fig. 10. Transient response at 200 V

На осциллограммах, полученных при моделировании (рис. 10–12), так же как и на осциллограммах, полученных из эксперимента (рис. 7–9), можно наблюдать, что с нарастанием напряжения на диагностируемой изоляции увеличивается амплитуда переходной характеристики и вместе с ней высокочастотная составляющая. С появлением частичных разрядов происходит уменьшение высокочастотной составляющей.

Сравнение осциллограмм, полученных на физической модели и смоделированных в Micro-Cap, показывает их удовлетворительное сходство. Ос-

новными критериями сходства являются, во-первых, появление либо исчезновение высокочастотной составляющей. Во-вторых, затухание высокочастотных колебаний, которое объясняется рассеиванием энергии в искре частичного разряда. Это доказывает правильность выдвинутого объяснения явлений, происходящих в частичном разряде при воздействии импульсного напряжения [17], и адекватность разработанной модели процессам, протекающим в экспериментальной схеме при наличии или отсутствии в изоляции частичных разрядов.

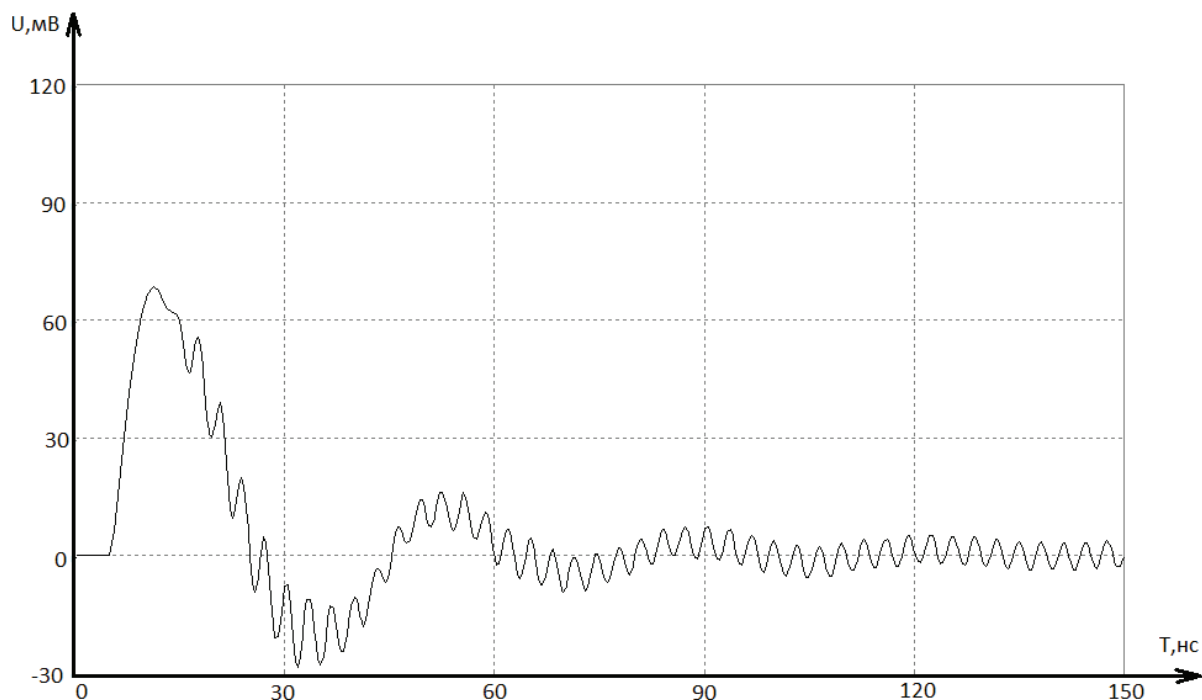


Рис. 11. Переходная характеристика при 260 В

Fig. 11. Transient response at 260 V

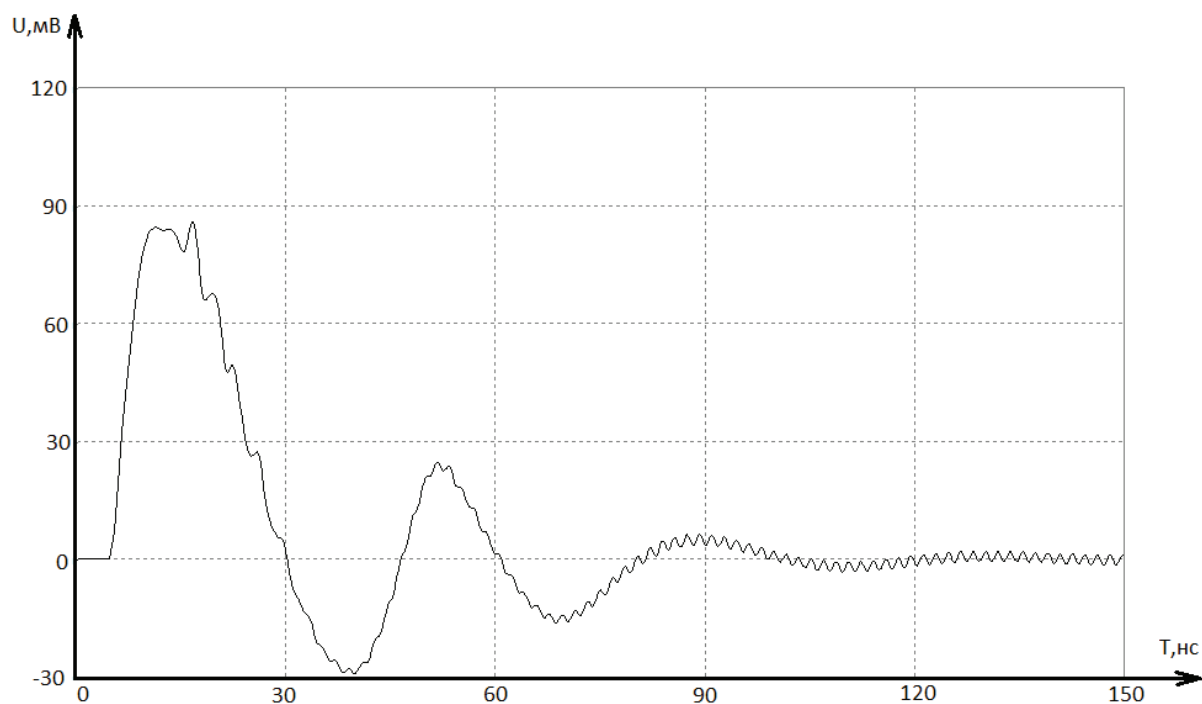


Рис. 12. Переходная характеристика при 320 В

Fig. 12. Transient response at 320 V

Полученные результаты моделирования позволяют по виду переходной характеристики, снятой на реальном объекте, и характеристики, полученной на модели с подбором параметров дефекта, оценивать степень поражения твердой изоляции частичными разрядами. Набор практических ста-

тистических данных по выходу из строя изоляции машин постоянного тока и сопоставление степени поражения изоляции частичными разрядами позволит прогнозировать остаточный ресурс оборудования и своевременный вывод его из эксплуатации для профилактики или ремонта. Таким обра-

зом, можно повысить надежность эксплуатации и предупредить случайные аварии, связанные с пробоем изоляции из-за частичных разрядов.

Закключение

Предложенная электрическая модель удовлетворительно отражает полученные ранее экспериментальные результаты на физической модели по регистрации частичных разрядов и подтверждает работоспособность метода по обнаружению частичных разрядов с помощью приложения к изоляции импульсного напряжения с регистрацией тока переходного процесса.

Найденная связь между формой наблюдаемых осциллограмм тока и наличием или отсутствием частичных разрядов в диагностируемом объекте позволяет сделать вывод о влиянии науглерожива-

ния дефектов при частичном разряде на форму осциллограмм и сделать заключение, что науглероживание может затруднить обнаружение частичных разрядов. В связи с этим требуется регулярный контроль состояния изоляции для своевременного обнаружения частичных разрядов и предотвращения неожиданного выхода из строя высоковольтной изоляции.

Модель протекания процессов в твердом диэлектрике при диагностике изоляции на наличие частичных разрядов импульсным методом в совокупности с экспериментальными результатами позволяет оценивать степень поражения твердой изоляции частичными разрядами. В перспективе данный подход позволит прогнозировать остаточный ресурс работы изоляции при соответствующем уровне рабочего напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение предприятий добычи и переработки нефти и газа. – М.: Форум, 2014. – 352 с.
2. Сибикин Ю.Д. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности. Оборудование систем электроснабжения. – М.: ИП РадиоСофт, 2015. – 352 с.
3. Галичин Н.А., Борисова М.Э. Влияние частичных разрядов на спектры токов термостимулированной деполаризации // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. Физика. – 2009. – № 79. – С. 119–128.
4. Аксенов Ю.П. Мониторинг технического состояния высоковольтной изоляции электрооборудования энергетического назначения в эксплуатации и при ремонтах. – М.: Научтехлитиздат, 2002. – 338 с.
5. Mason J.H. The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges // Journal of Institution of Electrical Engineers. – 1951. – V. 1951. – P. 76.
6. Беркс Дж.Б., Шульман Дж.Г. Прогресс в области диэлектриков // Госэнергиздат. – 1962. – Т. 1. – С. 118–166.
7. Tsyokhla I., Griffo A., Wang J. On-line monitoring of winding insulation health using high frequency common mode voltage from PWM // IEEE International Electric Machines & Drives Conference. – USA, 2015. – P. 1433–1439.
8. Wahidabanu R.S.D., Panneerselvam M.A., Udayakumar K. Diagnosis and monitoring of high-voltage insulation using computerized analysis of partial discharge measurements // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. – 1998. – V. 23. – P. 171–177.
9. Partial discharges in void defect of gas insulated switchgear insulator under standard aperiodic and oscillating switching impulses / Ming Ren, Ming Dong, Chongxing Zhang, Jialin Liu // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2016. – V. 23. – P. 2933–2941.
10. Голенко О.В., Живодерников С.В., Овсянников А.Г. Регистрация частичных разрядов в изоляции маслонаполненного оборудования // Повышение эффективности работы энергосистем: Труды Ивановского государственного энергетического университета. – 2001. – Вып. 4. – С. 303–309.
11. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
12. On-line partial discharge (OLPD) insulation condition monitoring of complete high voltage (HV) networks in the oil & gas industry / L. Renforth, A. Burgess, M. Foxall, Th. Raczky // IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference. – Brasil, 2014. – P. 14–23.
13. A new technique for the remote partial discharge monitoring of the stator insulation of high-voltage motors located in «Ex» (hazardous) locations / L. Renforth, R. Armstrong, D. Clark, S. Goddard, P.S. Hamer // Petroleum and Chemical Industry Conference. – USA, 2012. – P. 1–10.
14. Study on the methodology of monitoring insulation defects of high-voltage bushing / Yu-sheng Quan, Zi-sen Ning, Shu-yong Chen, Tie-ying Xu, Yu Zhou // IEEE International Symposium on Electrical Insulation. – USA, 2012. – P. 156–159.
15. Аксенов Ю.П., Завидей В.И., Ярошенко И.В. Использование усовершенствованных методов электромагнитной локализации разрядных явлений для определения объема ремонта трансформаторов // Электро. – 2004. – № 5. – С. 19–24.
16. Акустическая локация электрических разрядов в измерительных трансформаторах / А.П. Долин, С.К. Цветаев, Ч. Поночко, А. Поночко // Электро. – 2005. – № 2. – С. 27–31.
17. Ботяев Ю.В., Михеев А.Г., Храмов А.Н. Диагностика высоковольтного оборудования подстанции // Повышение эффективности работы энергосистем: Труды Ивановского государственного энергетического университета. – 2001. – Вып. 4. – С. 291–294.
18. Виноградова Л.В. Экспертная поддержка процессов проектирования и диагностики силовых трансформаторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 1996. – 18 с.
19. Stone G., Kapler J. Stator winding monitoring // IEEE Industry Applications Magazine. – 1998. – V. 4. – P. 15–20.
20. Овсянников А.Г. Стратегии ТОиР и диагностика оборудования // Новости электротехники. – 2008. – № 2. – С. 140–142.
21. Checking features of the transformer winding mechanical joint conditions by the method of low voltage impulse / V.A. Lavrinovich, Dobizha N.E., Pichugina M.T., G.A. Nizkodubov // 9th International Forum on Strategic Technology. – Bangladesh, 2014. – P. 382–385.
22. 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.
23. 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.
24. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2015. – V. 22. – P. 2041–2045.
25. Стругов В.В., Лавринович В.А. Обнаружение частичных разрядов в машинах постоянного тока импульсным методом //

- Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 72–77.
26. Устройство для обнаружения частичных разрядов: пат. Рос. Федерация. № 2014106561/07; заявл. 20.02.2014; опубл. 17.03.2015, Бюл. № 16. – 5 с.
27. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 458 с.
28. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с.
29. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007. – 41 с.

Поступила 02.12.2016 г.

Информация об авторах

Стругов В.В., аспирант Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Лавринович В.А., доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.3:001.893

CIRCUIT SIMULATION OF PARTIAL DISCHARGE ASPECTS

Vyacheslav V. Strugov¹,
sv_altai@sibmail.com

Valery A. Lavrinovich¹,
lavrho@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The DC motors are used in most production processes of oil, mining, coal and other industries. Reliability of their operation largely depends on the state of insulation such as enamel wire insulation and the main insulation of large electrical machines. Insulation defects lead to unexpected failure of electrical machines and, as a consequence, to emergencies, downtime and high economic losses due to undersupply of products and costs of machine failure liquidation. There are a lot of reasons for DC motors failure; most of them are associated with insulation damage due to exposure by partial discharges. It is necessary to identify partial discharges at the early stage to be repaired in time; it will reduce unplanned stops and expenses to replace a failed motor. Since the beginning of the twentieth century a lot of attention is paid to investigation of occurrence and impact of partial discharges on insulation. The bulk of the research refers to the equipment operating on alternating voltage. For the equipment operating at constant voltage the reliable methods for detecting partial discharges have not been developed yet. So, the theme of identifying partial discharges in DC machines is quite urgent. A promising method for detecting partial discharges is the use of the pulsed method. The method is based on the diagnosis of the transition process in the winding–insulation system of the electrical machine when applying a high-voltage pulse to the input of a diagnostic winding-machine. According to the response from the diagnostic pulse it is possible to judge on the partial discharges presence in insulation and the voltage level at which they occur. For the detailed understanding of the transition process a circuit electric model is required to be developed in the winding insulation system based on partial discharges, since not all the winding states can be reproduced in real insulation machines.

The aim of the research is to develop the electrical model to demonstrate and to study the method of detecting partial discharges with the aid of the supplied pulse voltage on the test object.

Methods: circuit simulation of partial discharges manifestation observed in the experiment using the developed model in Micro-Cap.

Results. The authors have developed the electrical model of the experimental setup in which the conditions for the occurrence of partial discharges are artificially created and controlled. The model allows showing the appearance of partial discharges identical to the ones observed in the experiment. This helped to identify the relationship between the form of the oscillograms observed in the experiment with the presence or absence of partial discharges in the test object.

Key words:

DC motors, partial discharge, pulse method, detection, defect, carburizing, resource efficiency.

REFERENCES

1. Sibikin Yu.D. *Elektrosnabzhenie predpriyatiy dobychi i pererabotki nefiti i gaza* [Power supply of oil and gas mining and processing enterprises]. Moscow, Forum Publ., 2014. 352 p.
2. Sibikin Yu.D. *Elektrooborudovanie neftyanoy i gazovoy promyshlennosti. Oborudovanie sistem elektrosnabzheniya* [Electrical equipment of oil and gas industry. Power system equipment]. Moscow, IP RadioSoft Publ., 2015. 352 p.
3. Galichin N.A., Borisova M.E. Vliyaniye chastichnykh razryadov na spektry tokov termostimulirovannoy depolyarizatsii [Effect of partial discharge on spectra of thermally stimulated depolarization currents]. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Science, Physics*, 2009, no. 79, pp. 119–128.
4. Aksenov Yu.P. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovoltznoy izolatsii elektrooborudovaniya elektricheskogo naznacheniya v ekspluatatsii i pri remontakh* [Monitoring of technical state of high voltage insulation of electrical energy destination in operation and repairs]. Moscow, Nauchtekhizdat Publ., 2002. 338 p.
5. Mason J.H. The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges. *Journal of Institution of Electrical Engineers*, 1951, vol. 1951, p. 76.
6. Berx J.B., Shulman J.G. Progress v oblasti dielektrikov [Progress in dielectrics]. *Gosenergoizdat*, 1962, vol. 1, pp. 118–166.
7. Tsyokhla I., Griffo A., Wang J. On-line monitoring of winding insulation health using high frequency common mode voltage from PWM. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*. USA, 2015, pp. 1433–1439.
8. Wahidabanu R.S.D., Panneerselvam M.A., Udayakumar K. Diagnosis and monitoring of high-voltage insulation using computerized analysis of partial discharge measurements. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 1998, vol. 23, pp. 171–177.
9. Ming Ren, Ming Dong, Chongxing Zhang, Jialin Liu. Partial discharges in void defect of gas insulated switchgear insulator under standard aperiodic and oscillating switching impulses. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, vol. 23, pp. 2933–2941.
10. Golenko O.V., Zhivodernikov S.V., Ovsyannikov A.G. Registratsiya chastichnykh razryadov v izolyatsii maslonapolnenogo oborudovaniya [Register of partial discharges in insulation of oil-filled equipment]. *Povyshenie effektivnosti raboty energosistem. Trudy Ivanovskogo gosudarstvennogo energiticheskogo universiteta*, 2001, vol. 4, pp. 303–309.
11. Svi P.M. *Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniya vysokogo napryazheniya* [Methods and tools for diagnosis of high voltage equipment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992, 240 p.
12. Renforth L., Burgess A., Foxall M., Raczky Th. On-line partial discharge (OLPD) insulation condition monitoring of complete high voltage (HV) networks in the oil & gas industry. *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*. Brazil, 2014, pp. 14–23.
13. Renforth L., Armstrong R., Clark D., Goodfellow S., Hamer P.S. A new technique for the remote partial discharge monitoring of the stator insulation of high-voltage motors located in «Ex» (hazardous) locations. *Petroleum and Chemical Industry Conference*, 2012, pp. 1–10.

14. Yu-sheng Quan, Zi-sen Ning, Shu-yong Chen, Tie-ying Xu, Yu Zhou. Study on the methodology of monitoring insulation defects of high-voltage bushing. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. USA, 2012, pp. 156–159.
15. Aksenov Yu.P., Zavidy 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, vol. 5, pp. 19–24.
16. 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]. *Electro*, 2005, vol. 2, p. 27–31.
17. Botyayev Yu.V., Mikheev A.G., Khramtsev A.N. Diagnostika vysokovoltного oborudovaniya podstantsiy [Diagnosis of high-voltage substation]. *Trudy Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. Povyshenie effektivnosti raboty energosistem*, 2001, vol. 4, pp. 291–294.
18. Vinogradova L.V. *Ekspertnaya podderzhka protsessov proektirovaniya i diagnostiki silovykh transformatorov. Avtoreferat Dis. Kand. nauk* [Expert support of design and diagnostics of power transformers. Cand. Diss. Abstract]. Ivanovo, 1996. 18 p.
19. Stone G., Kapler J. Stator winding monitoring. *IEEE Industry Applications Magazine*, 1998, vol. 4, pp. 15–20.
20. Ovsyannikova A.G. Strategii TOiR i diagnostika oborudovaniya [MRO strategies and equipment diagnostics]. *Novosti elektrotehniki*, 2008, vol. 2, pp. 140–142.
21. Lavrinovich V.A., Dobizha N.E., Pichugina M.T., Nizkodobov G.A. Checking features of the transformer winding mechanical joint conditions by the method of low voltage impulse. *9th International Forum on Strategic Technology*. Bangladesh, 2014. pp. 382–385.
22. 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, vol. 4, pp. 149–153.
23. 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, vol. 6, pp. 145–147.
24. Lavrinovich V.A., Mytnikov A.V. Development of pulsed method for diagnostics of transformer windings based on short probe impulse. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, vol. 22, pp. 2041–2045.
25. Strugov V.V., Lavrinovich V.A. Detection of partial discharge in DC motors by pulse method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2015, vol. 1, no. 12, pp. 72–77. In Rus.
26. Lavrinovich V.A., Strugov V.V. *Ustroystvo dlya obnaruzhenia chastichnykh razryadov* [Device for detection of partial discharge]. Patent RF, no. 2553281, 2015.
27. Amelina M.A., Amelin S.A. *Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap 8*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2007. 458 p.
28. Kuchinskiy G.S. *Chastichnye razryady v vysokovoltnykh konstruktivnykh* [Partial discharges in high voltage designs]. Leningrad, Energiya Publ., 1979. 224 p.
29. Vdoviko V.P. *Chastichnye razryady v diagnostirovanii vysokovoltного oborudovaniya* [Partial discharges in diagnosis of high-voltage equipment]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2007. 41 p.

Received: 2 December 2016.

Information about the authors

Vyacheslav V. Strugov, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valery A. Lavrinovich, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.