

УДК 621.311

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ В СОСТАВЕ КОНСТРУКЦИИ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ СИЛОВЫХ (АВТО)ТРАНСФОРМАТОРОВ РАЗНОГО ГАБАРИТА

Анализ многолетних статистических данных позволяет отнести к наиболее значимым причинам отказов трансформаторов увлажнение и старение изоляции. По причине двух источников влаги в процессе работы трансформаторов, независимо от способа защиты масла, происходит постепенное накапливание воды в изоляции до опасных значений. Принимая во внимание негативное влияние на целлюлозную изоляцию как влаги, так и традиционных методов ее удаления, проведены экспериментальные исследования воздействия автоматизированных систем восстановления изоляции (АСВИ) на изоляцию трансформаторов разных конструкций. На примере глубокой осушки трансформаторного масла в модульных системах АСВИ типа TRANSEC раскрыты преимущества новых технологий в сравнении с традиционными способами сушки и защиты изоляции. Представлены результаты опытно-экспериментальной апробации исследуемых технологий на трансформаторах напряжением 35–500 кВ, имеющих вес твердой изоляции от 0,5 до 8 тонн, различные системы защиты масла и работающие с нагрузкой от 7 до 100% $S_{ном}$. Определены особенности сушки изоляции модульными системами АСВИ для трансформаторов разного габарита, сформированы рекомендации по применению.

АВТОР:

С.П. Высогорец,
д. т. н., член-корр. АЭН,
АО «НПО «Стример»

Ключевые слова:
#силовой трансформатор;
#увлажнение;
#изоляция; #сушка;
#автоматизированные системы.



Введение

Вопросы обеспечения эксплуатационной надежности маслонаполненных силовых (авто)трансформаторов (далее — Т) теснейшим образом связаны с техническим состоянием их узлов и элементов, которые подвергаются воздействию многочисленных факторов различной природы [1, 2, 3, 4]. Как следствие, в Т развивается ряд электрофизических и физико-химических процессов, инициирующих друг друга и усиливаемых внешними явлениями. Так, в межсезонные периоды [2], в которые наблюдаются резкие изменения электрической мощности и перепады температур, создаются условия повышенного риска возникновения отказов Т.

Особое место, с точки зрения обеспечения работоспособности Т, занимает непредсказуемое возникновение токов короткого замыкания. Многолетние статистические данные и их анализ [1, 2, 3, 4, 5, 6] позволяют отнести к наиболее значимым причинам отказов Т увлажнение и старение изоляции. Следствием увлажнения и загрязнения изоляции обмоток является снижение электрической прочности маслобарьерной изоляции с последующим пробоем первого масляного канала, что может вызвать развитие «ползущего разряда», ионизационный пробой витковой изоляции за счет вытеснения масла водяным паром из капилляров изоляции и повреждение Т [4]. По причине двух источников — атмосферной и влаги, образующейся как продукт старения, — в процессе работы Т, независимо от способа защиты масла, происходит ее постепенное накапливание в изоляции до значений, которые при определенных условиях приводят к отказу Т. Важно отметить, что устранение отказов Т по указанным причинам зачастую является сложным дорогостоящим мероприятием. При этом с увеличением мощности Т увеличивается масса и сложность конфигурации целлюлозной изоляции, что на-

ходит свое отражение в сложности ее сушки, особенно при значительном увлажнении — 3% и более. Не менее важным является и то, что скорость старения изоляции в значительной степени зависит от ее влагосодержания. Так, при достаточно низком влагосодержании изоляции срок службы Т по данным [6] может составлять 65–70 лет.

С учетом изложенного выше представляет интерес проведение экспериментального исследования влияния автоматизированных систем восстановления изоляции (далее — АСВИ) на изоляцию трансформаторов разных конструкций: классом напряжения 35–500 кВ, имеющих различный вес твердой изоляции и маслосистемы, а также различные системы защиты масла.

Преимущества современных АСВИ

Модульные системы АСВИ являются новыми технологиями для Российской Федерации, которые начали входить в систему сервиса Т с 2019 года благодаря набору существенных преимуществ перед классическими методами восстановления изоляции.

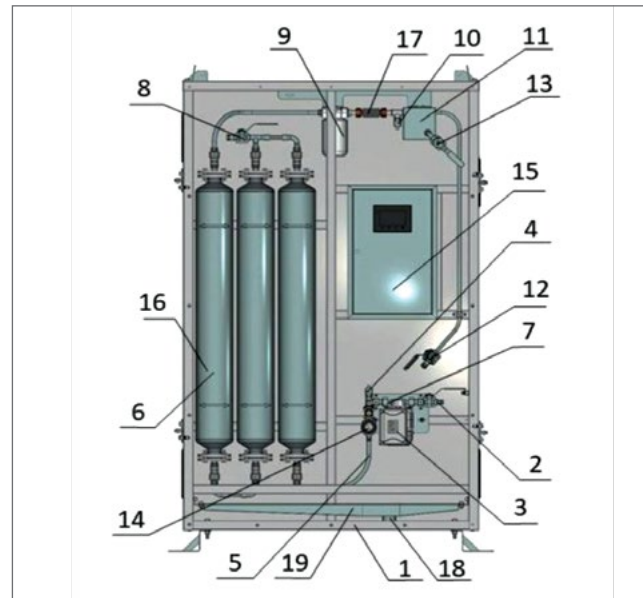
Классические методы сушки твердой изоляции, применяемые в период капитальных ремонтов (далее — КР), являются трудоемкими процедурами, требующими участия квалифицированного персонала и использования специализированной оснастки, что сказывается на их значительной стоимости. Различные способы сушки твердой изоляции в период КР, такие как циркуляция горячего сухого масла, термовакуумная диффузия, разбрызгивание горячего масла воздухом, сушка индукционным методом, сопряжены с воздействием высоких температур (85–100 °С) и в ряде случаев вакуума [7, 8]. Это оказывает негативное влияние на целлюлозу и может приводить к короблению,

тепловому старению, термической деструкции и локальным перегревам изоляции [9]. Вместе с этим указанные способы являются технологиями быстрой сушки, ведущими к линейной усадке изоляции [9, 10]. Необходимость формирования ремонтных режимов, разгерметизация Т, длительное присутствие персонала в действующей электроустановке также являются негативными аспектами классических способов сушки.

В отношении различных способов защиты масла основного бака Т стоит отметить, что, в отличие от защиты от продуктов окислительного старения, воздействия высоких температур и кислорода воздуха, конструкция Т недостаточно приспособлена для защиты целлюлозы от накапливания влаги и снижения ее вредоносного воздействия. Так, применение интеллектуальных систем управления охлаждением Т, использование высокостабильных масел, а также наличие термосифонных/адсорбционных фильтров (далее — ТСФ/АДФ) позволяет снижать негативные эффекты от влияния высоких температур и процессов/продуктов окисления масел. При этом в связи со старением уплотнительной резины по истечении 15–25 лет нарушается герметизация Т, что становится источником проникновения атмосферной влаги в основной бак Т и ее накапливания в целлюлозе. На рост влажности твердой изоляции также оказывает влияние влага, образующаяся в процессе старения как целлюлозы, так и трансформаторного масла. По результатам исследований [11, 12], прирост влажности бумажной изоляции по указанной причине составляет в среднем в год 0,04–0,05%. Азотная и пленочная защиты, а также воздухоосушительные фильтры не обеспечивают достаточной защиты от атмосферной влаги, в особенности при старении уплотнительной резины, при этом ТСФ/АДФ не способны эффективно снижать негативное влияние влаги.

ОБЩИЙ ВИД МОДУЛЯ АСВИ ТИПА TR.CL.3-WS-A-5-I-6.1-УХЛ1

Рис. 1



Обозначения: 1 — рама; 2 — впускной шаровый кран; 3 — насос; 4 — датчик влагосодержания и температуры масла на входе; 5 — соединительные трубопроводы; 6 — резервуары адсорбции; 7 — пробоотборный кран на входе; 8 — воздухоперепускной кран между 1 и 2 резервуарами; 9 — фильтр тонкой очистки; 10 — датчик влагосодержания и температуры масла на выходе; 11 — деаэрактор; 12 — воздухоперепускной кран деаэратора (пробоотборный кран на выходе); 13 — выпускной шаровый кран; 14 — индикатор потока; 15 — шкаф мониторинга и управления; 16 — шкаф наружный; 17 — расходомер; 18 — поплавковый датчик уровня; 19 — поддон.

При оценке влияния ТСФ/АДФ на содержание влаги в изоляции Т важно принимать во внимание, что данные узлы засыпаются силикагелями марки КСКГ, в отличие от применяемых в АСВИ исследуемого типа цеолитов марки NaA. Уровень и скорость адсорбции цеолита NaA намного выше, чем у силикагеля КСКГ. Так, цеолит обладает значительной влагоемкостью как при низкой, так и при высокой относительной влажности среды (от 10 до 100%), что не характерно для силикагеля, необходимая влагоемкость которого наблюдается при относительной влажности среды не менее 50–70% [13]. Также цеолиты обладают высокой адсорбционной способностью в широком температурном диапазоне, в т.ч.

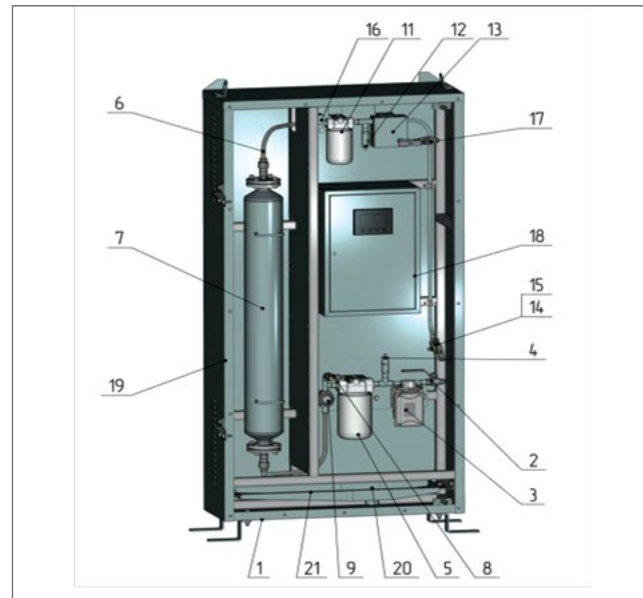
при повышенных температурах [13]. У силикагеля адсорбционная способность применительно к воде резко снижается при температуре выше 38 °С, что критично, т.к. рабочий диапазон температур трансформаторного масла в баке Т составляет от 20 °С до 80 °С. Цеолиты содержат равномерную сеть кристаллических пор и пустых адсорбционных полостей, что придает им внутреннюю адсорбирующую поверхность площадью 800 г/м² (½ общего объема кристаллов), выгодно отличающуюся от силикагелей — 350 г/м². Таким образом, цеолиты могут обеспечивать удаление из масла значительной части растворенной воды в широком температурном диапазоне даже при малом ее содержании. Это свойство позволяет

использовать цеолит NaA для глубокой осушки трансформаторного масла в модульных системах АСВИ исследуемого типа. Именно глубоко осушенное масло, омывая влажную бумагу, за счет эффектов диффузии отбирает из твердой изоляции воду и уносит ее к цеолитам, что позволяет модулям АСВИ не просто сушить масло на работающем Т, а в первую очередь сушить твердую изоляцию [14–17].

Соответственно, в ходе опытно-экспериментальной работы по апробации АСВИ исследуемого типа были изучены конструкционные и эксплуатационные преимущества модулей в сравнении с традиционными технологиями обработки и защиты изоляции, среди которых:

ОБЩИЙ ВИД МОДУЛЯ АСВИ ТИПА TR.CL.1-WS-A-5-I-6.1-УХЛ1

Рис. 2



Обозначения: 1 — рама; 2 — впускной шаровый кран; 3 — насос; 4 — датчик влагосодержания и температуры масла на входе; 5 — фильтр предочистки масла (10 мкм); 6 — соединительные трубопроводы; 7 — резервуар адсорбции; 8 — пробоотборный кран на входе; 9 — датчик потока; 10 — дверь (не показано); 11 — фильтр тонкой очистки (3 мкм); 12 — датчик влагосодержания и температуры масла на выходе; 13 — деаэрактор; 14 — воздухоперепускной кран деаэратора; 15 — пробоотборный кран на выходе; 16 — индикатор потока; 17 — выпускной шаровый кран; 18 — шкаф мониторинга и управления (далее ШМУ); 19 — шкаф наружной установки; 20 — поплавковый датчик уровня; 21 — поддон.

- упрощенная технология монтажа и сервиса модулей;
- отсутствие необходимости формирования ремонтной схемы для работы модулей, в т.ч. их сервисного обслуживания. В ряде случаев возможен монтаж модулей на Т под нагрузкой, что было подтверждено в ходе опытно-экспериментальной апробации;
- наличие удаленного мониторинга процесса восстановления изоляции и управление работой модулей на основе потока оцифрованных данных;
- автоматическая работа модулей без надзора персоналом за счет элементов самодиагностики;
- отсутствие негативного влияния модулей на изоляцию Т благодаря применению щадящих методов обработки;
- отсутствие негативного влияния на предиктивную диагностику, а также содержание антиокислительной присадки.

Важно отметить, что автоматизация ряда работ по обработке изоляции системами АСВИ исследуемого типа уменьшает долю присутствия человека в действующей электроустановке (соответственно, риски травматизма), исключает влияние человеческого фактора на результат работы, расширяет период эффективной обработки изоляции по месту установки Т с учетом климатических температур и погодных явлений, минимизирует риски негативного влияния атмосферных осадков на результат восстановления изоляционных характеристик электрических машин.

Экспериментальные исследования АСВИ типа TRANSEC на трансформаторах разной конструкции

В период с 2019 по 2023 год компанией АО «НПО «Стример» была проведена опытно-экспериментальная апробация модулей TRANSEC двух типов:

ОБЪЕКТЫ ПИЛОТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛЕЙ АСВИ ИССЛЕДУЕМОГО ТИПА

Таблица 1

№	Тип трансформатора	Год изготовления (способ защиты масла*)	Средняя нагрузка S _{ном} , %	Дата установки (тип) модуля
1	ТМ-6300/110	1968 (СД)	60	08.2022 (CL1WS)
2	РОДЦ-60000/500	1973 (СД)	100	08.2022 (CL3WS)
3	АТДЦТН-63000/220	1980 (СД)	11	11.2022 (CL3WS)
4	РТД-20000/35	1983 (СД)	90	10.2022 (CL3WS)
5	АТДЦТН-125000/220	1974 (АЗ)	45	10.2022 (CL3WS)
6	ТДН-10000/110	1969 (СД)	7	09.2022 (CL3WS)
7	ТДТН-31500/110	1966 (СД)	25	08.2022 (CL3WS)
8	АТДЦТНГ-125000/220	1970 (СД)	48	11.2022 (CL3WS)
9	АОДЦТН-167000/500	1994 (ПЗ)	38	11.2022 (CL3WS)
10	АОДТГ-80000/220	1956 (АЗ)	60	11.2022 (CL3WS)
11	АОДЦТН-167000/500	1990 (ПЗ)	22	09.2022 (CL3WS)
12	ТДТНГ-31500/110	1960 (СД)	26	09.2022 (CL3WS)
13	АТДЦТГН-63000/220	1978 (СД)	49	09.2022 (CL3WS)
14	АТДЦТ-240000/330	1980 (ПЗ)	33	10.2022 (CL3WS)
15	АТДЦТН-63000/220	1984 (ПЗ)	17	10.2022 (CL3WS)
16	ТДТН-16000/110	1967 (СД)	10	10.2021 (CL3WS)
17	ТРДЦН-63000/110	1984 (СД)	20	05.2019 (CL3AM)
18	ТДТНГ-20000/110	1965 (СД)	25	11.2021 (CL3WS)
19	ТДТН-16000/110	1980 (СД)	54	02.2022 (CL3WS)

* Способ защиты масла: СД — свободное дыхание, ПЗ — пленочная защита, АЗ — азотная защита.

TR.CL.1-WS-A-5-I-6.1-УХЛ1 (далее — CL1WS) и TR.CL.3-WS-A-5-I-6.1-УХЛ1 (далее — CL3WS) (см. рис. 1 и 2).

Опытно-экспериментальные работы по апробации модулей TRANSEC были организованы на 19 Т, сведения о которых представлены в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что экспериментальное применение модулей TRANSEC проведено на маслонаполненных

силовых (авто)трансформаторах и шунтирующих реакторах разной конструкции классом напряжения 35, 110, 220, 330 и 500 кВ, имеющих вес твердой изоляции от 0,5 до 8 тонн и маслосистемы от 5 до 63 тонн, а также различные системы защиты масла: пленочную, азотную защиту и «свободное дыхание» (воздухоосушительный фильтр). Важно отметить, что апробация модулей TRANSEC проведена на Т, работающих с разной нагрузкой: от 7 до 100% от S_{ном}.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПИЛОТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛЕЙ ИССЛЕДУЕМОГО ТИПА

Таблица 2

№	Тип трансформатора	Время работы модуля	Улучшение изоляции обмоток	Улучшение качества масла	Количество удал. воды (V _{вс} [*])
1	ТМ-6300/110	3 мес.	на 32 % (R60) на 26 % (tgδ)	на 24% (W _м)	1,23 кг (0,41 кг/м)
2	РОДЦ-60000/500	5 мес.	—	на 25 % (U _{пр}) Стабильность характеристик масла	7,72 кг (1,54 кг/м)
3	АТДЦТН-63000/220	2 мес.	нет измерений	на 23 % (U _{пр})	2,74 кг (1,37 кг/м)
4	РТД-20000/35	3 мес.	—	на 57 % (W _м) на 43 % (U _{пр})	4,68 кг (1,56 кг/м)
5	АТДЦТН-125000/220	6 мес.	на 80 % (tgδ)	на 58 % (U _{пр})	4,39 кг (0,73 кг/м)
6	ТДН-10000/110	5 мес.	на 20 % (R60) на 18 % (tgδ)	Стабильность характеристик масла	8,97 кг (1,79 кг/м)
7	ТДТН-31500/110	8 мес.	—	Стабильность характеристик масла	6,30 кг (0,79 кг/м)
8	АТДЦТ-НГ-125000/220	6 мес.	на 99 % (R60)	на 10 % (W _м) на 6 % (U _{пр})	7,09 кг (1,18 кг/м)
9	АОДЦТН-167000/500	2 мес.	—	на 37 % (W _м) на 4 % (U _{пр})	3,09 кг (1,55 кг/м)
10	АОДТГ-80000/220	5 мес.	нет измерений	Стабильность характеристик масла	8,20 кг (1,64 кг/м)
11	АОДЦТН-167000/500	2,7 мес.	нет измерений	на 50 % (W _м) на 12 % (U _{пр})	3,20 кг (1,19 кг/м)
12	ТДТНГ-31500/110	7 мес.	на 57 % (R60) на 58 % (tgδ)	—	5,88 кг (0,84 кг/м)
13	АТДЦТГН-63000/220	3 мес.	нет измерений	на 11 % (W _м) на 54 % (U _{пр})	6,08 кг (2,03 кг/м)
14	АТДЦТ-240000/330	2,5 мес.	—	на 19 % (U _{пр})	2,44 кг (0,98 кг/м)
15	АТДЦТН-63000/220	8 мес.	нет измерений	на 38 % (W _м) на 5 % (U _{пр})	3,14 кг (0,39 кг/м)
16	ТДТН-16000/110	10 мес.	на 42 % (R60) на 29 % (tgδ)	на 28 % (W _м)	6,57 кг (0,66 кг/м)
17	ТРДЦН-63000/110	7 мес.	на 29 % (R60) на 44 % (tgδ)	на 103 % (W _м)	4,74 кг (0,68 кг/м)
18	ТДТНГ-20000/110	11 мес.	на 44 % (R60) на 53 % (tgδ) на 24 % (W _{ти} ^{**})	на 31 % (W _м)	10,8 кг (0,98 кг/м)
19	ТДТН-16000/110	6 мес.	на 87 % (R60) на 38 % (tgδ) на 17 % (W _{ти})	на 61 % (W _м) на 70 % (U _{пр})	7,20 кг (1,2 кг/м)

* V_{вс} — скорость высушивания изоляции трансформатора: масса (кг) воды, удаляемой за месяц.

** W_{ти} — влажность твердой изоляции, измеренная методом диэлектрической спектроскопии прибором IDAX.

В область экспериментальных исследований вошли Т с ухудшенными изоляционными характеристиками, в ряде случаев с признаками старения жидкого диэлектрика:

- у 7 Т ухудшенное состояние жидкого диэлектрика по показателям «влажностное содержание масла» (далее — W_м) и «пробивное напряжение масла» (далее — U_{пр});
- у 7 Т наличие признаков старения масла в начальной или глубокой стадии;
- у 6 Т нестабильное состояние масла по показателям W_м и U_{пр} за последние 2–3 года эксплуатации, при этом у одного Т этот период составил 11 лет. Обнаруженное ежегодное ухудшение электроизоляционных характеристик жидкого диэлектрика на указанном отрезке жизненного цикла Т может быть связано с недостатками системы защиты масла, старением изоляции и/или уплотнительной резины (являющейся источником проникновения атмосферной влаги в бак Т), а также низкой эффективностью классических способов восстановления изоляции;
- у 10 Т сопротивление изоляции обмоток, приведенное к 20 °С (далее — R60) менее 3000 МОм, при этом у двух Т тангенс угла диэлектрических потерь изоляции обмоток, приведенный к 20 °С (далее — tgδ), более 1%;
- у 9 Т межремонтный период составил менее 2–3 лет, при этом у одного Т обработка изоляции проводилась каждый год в течение 10 лет. Суммарно для 15 Т зафиксировано 37 ремонтных работ, связанных с восстановлением изоляции и/или характеристик масла. Уменьшенный межремонтный период анализируемых Т указывает на сниженную эффективность применяемых классических технологий восстановления изоляции;
- 18 Т имеют срок эксплуатации свыше 30 лет.

Результаты опытно-экспериментальной апробации АСВИ типа TRANSEC на трансформаторах разной конструкции

Эффективность воздействия модулей исследуемого типа на изоляцию Т оценивалась по следующим критериям: улучшение изоляции обмоток, улучшение качества масла, удаление установленного количества воды (результаты представлены в таблице 2).

Из таблицы 2 следует, что за фактическое время работы модулей зафиксированы следующие улучшения технического состояния Т:

- у 9 Т общее улучшение изоляционных характеристик обмоток. Соответственно, у 8 Т улучшение по R60 в диапазоне от 22% до 99% и у 8 Т улучшение по tgδ в диапазоне от 18% до 80%, у двух Т снижение W_{ти} на 24% и 17%.
- у 18 Т общее улучшение характеристик жидкого диэлектрика. Соответственно, у 11 Т улучшение по W_м в диапазоне от 10% до 103%, у 11 Т улучшение по U_{пр} в диапазоне от 4% до 70%. Для четырех Т обеспечена стабильность характеристик эксплуатационного масла по показателям W_м и U_{пр}, в сравнении с их ежегодным ухудшением из-за состаренной уплотнительной резины, неэффективной работы существующей системы защиты масла и процессами окислительной деградации диэлектрика;
- из изоляции Т удалено от 1,24 до 10,80 кг воды (суммарно из 19 Т удалено 102,67 кг воды). Среднее количество удаленной воды на один Т составило 5,5 кг, средняя скорость высушивания изоляции составила 1,13 кг/мес.;
- технологических нарушений в работе Т в период опытно-экспериментальной апробации модулей исследуемого типа не зафиксировано.

По результатам физико-химических анализов проб масла в ходе экспе-

риментальных исследований модулей исследуемого типа подтверждено отсутствие их негативного влияния на содержание растворенных газов, ионола и количество загрязнений масла бака Т частицами адсорбента (цеолита). Полученные результаты находятся в согласии с исследованиями авторов [14], согласно которым молекула воды предпочтительнее адсорбируется цеолитами из-за ее более высокого дипольного момента: отмечен следующий порядок предпочтения адсорбции различных молекул подходящего размера цеолитами NaA: H2O>NH3>CO2>N2>CH4. Также полученные результаты эксперимента не противоречат исследованиям [15]: согласно установленной корреляции между эффективным размером пор цеолитов и кинетическими диаметрами различных молекул (в диапазоне t от -196 °С до +146 °С) избирательность адсорбции цеолитов марки NaA обусловлена размером пор 3–4 Å, обеспечивающих приоритетное поглощение только молекул воды.

Таким образом, по результатам экспериментального применения АСВИ исследуемого типа подтверждена их эффективность в части восстановления и поддержания изоляционных характеристик независимо от рабочей нагрузки и конструкции Т без негативного влияния на предиктивную диагностику и штатную работу электрических машин.

Особенности сушки изоляции трансформаторов различных конструкций

С целью определения оптимального периода и способа применения исследуемых модулей проведено изучение массы извлекаемой воды и интервала времени, необходимого для достижения W_{ти} 2%, с учетом эмпирически установленной скорости высушивания изоляции модулем для подконтрольных Т, известной стартовой влажности и массы целлюлозной изоляции. Результаты

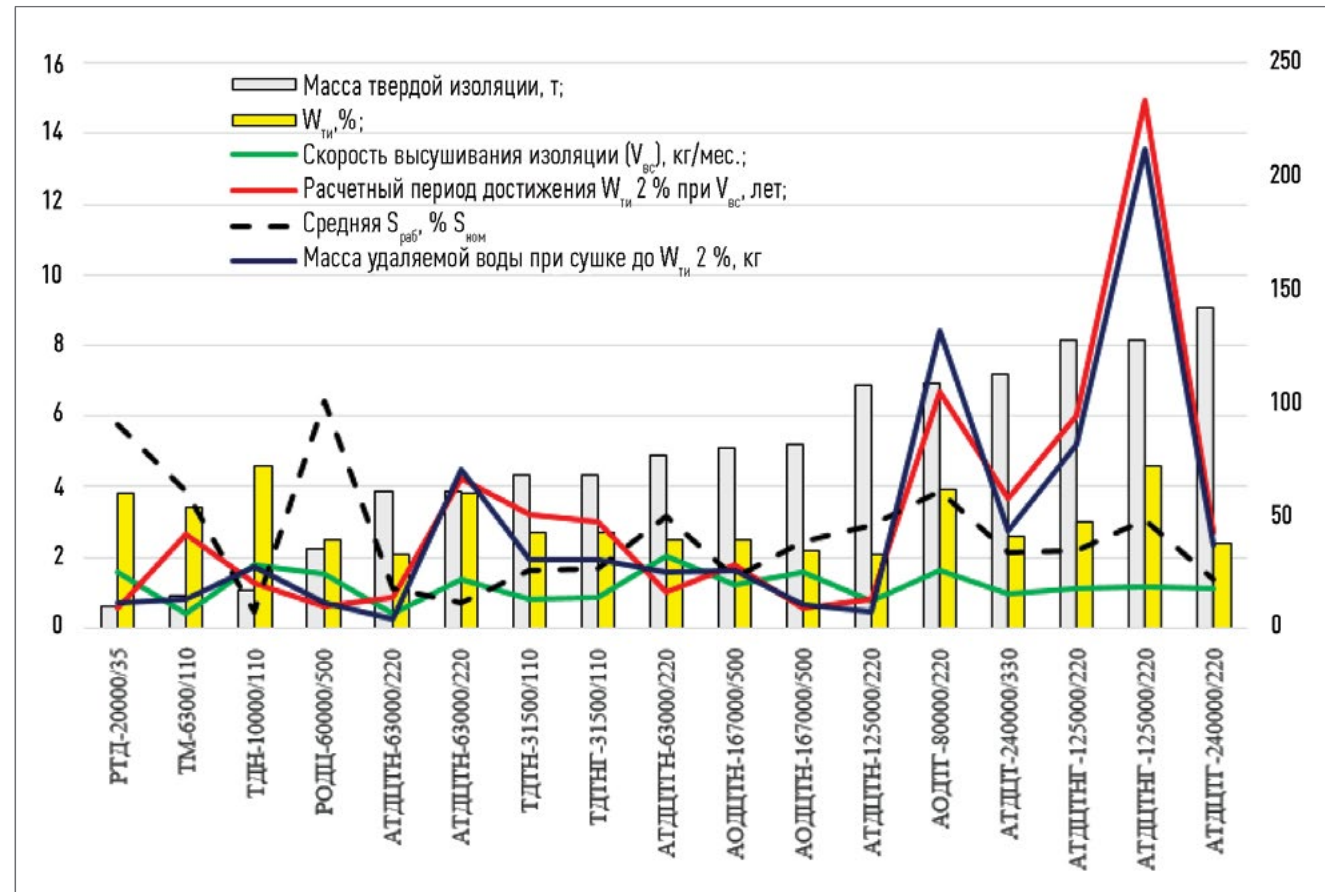
анализа представлены в виде комбинированного графика на рисунке 3, из которого следует:

- колебание скорости извлечения воды (V_{вс}) существенно не зависит от нагрузки Т и стартовой влажности целлюлозной изоляции. На скорость высушивания целлюлозной изоляции в большей степени влияют комбинация атмосферной температуры и температура эксплуатационного масла;
- время, необходимое для высушивания Т до W_{ти} 2%, зависит от массы твердой изоляции: чем больше масса твердой изоляции, тем длительнее процесс удаления влаги;
- для Т с массой твердой изоляции от 3,5 тонн и более отмечена характерная зависимость стартовой W_{ти} и времени высушивания изоляции до нормируемых значений (2%). Так, для Т мощностью 63 МВА и более при W_{ти} 3% и более значительно увеличивается продолжительность удаления воды из целлюлозы. Это обусловлено значительным объемом накапливающейся влаги в бумаге, которая может достигать 200 кг и более, а время высушивания модулем — 5–14 лет. Соответственно, для Т мощностью 63 МВА и более целесообразно начинать сушку изоляции модулем исследуемого типа при ее увлажнении от 2,5%. Также для данных Т оправдана стационарная установка исследуемых модулей, что существенно снизит скорость нарастания влаги в бумажной изоляции или полностью исключит этот процесс;
- для Т мощностью менее 31,5 МВА влажность W_{ти} 3% и более не вызывает существенного роста длительности высушивания изоляции данным модулем и находится в пределах от 0,5 до 2,5 лет.

При оценке целесообразности применения модулей исследуемого типа

ЗАВИСИМОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ И КОЛИЧЕСТВА УДАЛЯЕМОЙ ВОДЫ ОТ МАССЫ ИЗОЛЯЦИИ И РАБОЧЕЙ НАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРА

Рис. 3



для сушки крупногабаритных Т важно отметить, что классические технологии обработки твердой изоляции, применяемые при КР, позволяют удалять в день из твердой изоляции 2–3 кг воды методом термовакuumной диффузии и 5–7 кг воды методом разбрызгивания горячего масла. Таким образом, для удаления 200 кг воды из бумаги в ходе КР потребуется от 80 до 33 дней только на технологические операции по сушке, что неприемлемо при проведении ремонта по месту установки Т по следующим причинам:

- ограничение продолжительности разгерметизации оборудования для минимизации ее негативного воздействия;

- ограничение общей продолжительности ремонтных работ режимом сети;
- длительное разрушительное воздействие высоких t (80–98 °С) и вакуума на целлюлозную изоляцию при использовании традиционных методов. Для Т со сверхнормативным сроком эксплуатации, имеющих признаки старения, применение указанных технологий сушки недопустимо;
- существенные риски негативного влияния атмосферных осадков, вплоть до необратимого ухудшения;
- удаление значительного количества воды из изоляции Т сопряжено с необходимостью после-

дующей подпрессовки обмоток, т.е. проведением высококвалифицированных работ, от качества которых зависит надежность оборудования, в т.ч. его электродинамическая стойкость. Так, быстрая сушка целлюлозной изоляции приводит к линейной усадке обмоток Т примерно на 0,5% при изменении влагосодержания на 1%, при этом величина усадки будет зависеть от приложенного давления (сжимающего усилия) и может достигать до 3,5% [9, 10].

Соответственно, стационарная установка модулей исследуемого типа на Т крупных габаритов будет выполнять две важнейшие функции:

- мультифункциональная автоматизированная система восстановления изоляции на оборудовании под нагрузкой щадящими способами с цифровым управлением;
- новая система защиты изоляции от воздействия всех источников влаги и продуктов окисления с цифровым управлением, компенсирующая недостатки существующих систем защиты и стареющей уплотнительной резины.

Выводы

В процессе опытно-экспериментальной апробации на маслонаполненных силовых (авто)трансформаторах и шунтирующих реакторах разной конструкции напряжением 35, 110, 220, 330 и 500 кВ подтверждена высокая эффективность модулей исследуемого типа в части восстановления и поддержания изоляционных характеристик.

Отмечены технические преимущества применения модулей АСВИ исследуемого типа для обработки изоляции в сравнении с традиционными технологиями, применяемыми в период средних и капитальных ремонтов.

Подтверждены: отсутствие негативного влияния на штатную работу Т и их предиктивную диагностику; отсутствие необходимости формирования ремонтного режима для работы и сервисного обслуживания модулей исследуемого типа обеспечивает сохранение надежного электроснабжения потребителей и коммутационного ресурса электроаппаратов.

Рекомендовано применение технологий АСВИ данного типа для обслуживания маслонаполненных силовых (авто)трансформаторов и шунтирующих реакторов напряжением от 35 кВ и выше, мощностью от 10 МВА и более, независимо от способа защиты масла. Для маслонаполненных силовых (авто)трансформаторов мощностью

МОДУЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЯВЛЯЮТСЯ НОВЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ ДЛЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, КОТОРЫЕ НАЧАЛИ ВХОДИТЬ В СИСТЕМУ СЕРВИСА ТРАНСФОРМАТОРОВ С 2019 ГОДА БЛАГОДАРЯ НАБОРУ СУЩЕСТВЕННЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ ПЕРЕД КЛАССИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

от 63 МВА и более (в особенности — со сверхнормативным сроком эксплуатации) рекомендована стационарная установка модулей исследуемого типа как мультифункционального устройства, обеспечивающего восстановление, мониторинг и защиту изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

- Осотов В.Н. Практические аспекты оценки фактического срока службы силовых трансформаторов // III Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния оборудования объектов энергетики». 2016. С. 49.
- Балтынов Т.Т. Исследование отказов силовых трансформаторов при эксплуатации // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 1 / Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. С. 406–407.
- Хреников А.Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов при коротких замыканиях // Электричество. 2006. № 7. С. 17–24.
- Гун И.Г. Основные неисправности и методы диагностирования силовых трансформаторов в условиях эксплуатации / И.Г. Гун [и др.] // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. № 1. С. 102–105.

- Лизунов С.Д. Проблемы современного трансформаторостроения в России/С.Д. Лизунов, А.К. Лоханин // Электричество. 2000. № 8. С. 2–11.
- Лоханин А.К. Краткие обзоры докладов 43-й сессии СИГРЭ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2010. № 3. С. 80–87.
- Силовые трансформаторы: справочная книга / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004. 616 с.
- Справочник по ремонту и техническому обслуживанию силовых трансформаторов. М.: ИПК Госслужбы, 2008. 852 с.
- Лизунов С.Д. Сушка и дегазация трансформаторов высокого напряжения. М.: Энергия, 1971. 96 с.
- Bingelli J., Froidevaux J., Kratzer R. The treatment of transformers. Quality and completion criteria of the process. CIGRE, 1966. 110 p.
- Fabre J., Pichon A. Deteriorating processes and products of paper in oil, Application to transformers. CIGRE, 1960. 137 p.
- Субоч Я. Вода в изоляции обмоток силовых трансформаторов. Причины, последствия, методы исследования. Конференция ФГАОУ ДПО «ПЭИПК», 2020.
- Cybulski M., Przybylek P. Application of Molecular Sieves for Drying Transformers Insulated with Mineral Oil, Natural Ester, or Synthetic Ester. Energies. 2021. № 14. 1719 p.
- Fofana I., Wasserberg V., Borsi H., Gockenbach E. Drying of Transformer Insulation using Zeolite / IEEE Electrical Insulation Magazine January/February 2004. Vol. 20. № 1. P. 20–30.
- Breck D.W. Zeolite Molecular Sieve. John Wiley and Sons, 1974.
- Хреников А.Ю., Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Александров Н.М. Силовые трансформаторы в энергетических объектах: испытания, диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг. Учебное пособие. М.: Директ-Медиа, 2021. 335 с., ил.
- Хреников А.Ю. Высоковольтное электро-техническое оборудование в электроэнергетических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг. Учебное пособие. М.: ИНФРА-М, Высшее образование — Магистратура, 2019. 186 с.

Для цитирования: Высокорец С.П. Результаты экспериментального применения автоматизированных систем восстановления изоляции в составе конструкции маслонаполненных силовых (авто)трансформаторов разного габарита // Энергия единой сети. 2024. № 1 (72). С. 44–51.