Научная статья
УДК 621.314.212:621.3.017.2:621.3.017.3
doi:10.35694/YARCX.2026.73.1.012

АНАЛИЗ ЗАГРУЗКИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЕМ 35/10 кВ ОРЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Александр Александрович Лансберг
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия
lansbergaa@vk.com, ORCID 0000-0002-2834-6092

Реферат. В настоящее время множество работ направлено на оценку технического состояния силовых трансформаторов 35/10 кВ, разработку систем их мониторинга и технических средств, обеспечивающих повышение их защищённости от аварийных режимов. При этом в большинстве работ отсутствуют сведения о загрузке силовых трансформаторов 35/10 кВ и распределении потерь в них. Цель исследования – анализ загрузки силовых трансформаторов 35/10 кВ Орловской области, питающих сельские электрические сети, и распределения потерь в них. Анализ загрузки силовых трансформаторов 35/10 кВ Орловской области был выполнен по данным оперативных замеров нагрузки электросетевой компании – филиала «Россети Центр» – «Орёлэнерго» за 2022–2025 годы, которые осуществляются в июне и декабре. В ходе анализа были использованы данные о загрузке 152 силовых трансформаторов 35/10 кВ с номинальными мощностями от 1 МВА до 6,3 МВА, установленных на 95 трансформаторных подстанциях. Было выявлено, что среди рассмотренных 152 силовых трансформаторов 35/10 кВ загрузка 137 единиц не превышает 40%, что составляет 90% от общего количества трансформаторов 35/10 кВ в регионе. Потери холостого хода для рассмотренных типов силовых трансформаторов 35/10 кВ превышают потери короткого замыкания в 4,8–8,7 раза. Установлено, что трансформаторы типа ТМН-2,5/35/10 кВ являются наиболее широко распространёнными среди других типов, и их количество от общего парка трансформаторов составляет 20%. Полученные результаты исследования коэффициентов загрузки для разных рассмотренных номинальных мощностей силовых трансформаторов 35/10 кВ предполагается использовать для разработки компьютерной модели электрической сети 35/10 кВ в MATLAB Simulink и исследования режимов её работы.

Ключевые слова: *силовые трансформаторы 35/10 кВ, потери холостого хода, потери короткого замыкания, коэффициент загрузки, коэффициент мощности*

ANALYSIS OF LOAD AND DISTRIBUTION OF ELECTRIC POWER LOSSES IN 35/10 KV POWER TRANSFORMERS IN THE ORYOL REGION

Aleksandr A. Lansberg
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
lansbergaa@vk.com, ORCID 0000-0002-2834-6092

Abstract. Currently, a lot of work is at assessing the technical condition of 35/10 kV power transformers, developing their monitoring systems and technical means to increase their protection from emergency modes. At the same time, in most of the works there is no information on the loading of 35/10 kV power transformers and the distribution of losses in them. The purpose of the research is to analyze the load of 35/10 kV power transformers in the Oryol region supplying rural electric networks and the distribution of losses in them. The analysis of the load of 35/10 kV power transformers in the Oryol region was carried out according to the data of operational load measurements of the power grid company – the branch of "Rosseti Centr" – "Oryolenergo" for 2022–2025, which are carried out in June and December. The analysis used data on the load of 152 35/10 kV power transformers with rated capacities from 1 MVA to 6.3 MVA installed at 95 transformer substations. It was revealed that among the 152 35/10 kV power transformers examined, the load of 137 units does not exceed 40%, which is 90% of the total number of 35/10 kV transformers in the region. The no-load losses for the considered types of 35/10 kV power transformers exceed short-circuit losses by 4.8–8.7 times. It has been established that transformers of the TMN-2.5/35/10 kV type are the most widespread among other types,

and their number from the total transformer fleet is 20%. The obtained results of the study of load factors for different considered nominal capacities of 35/10 kV power transformers are supposed to be used to develop a computer model of a 35/10 kV electrical network in MATLAB Simulink and study its operating modes.

Keywords: *35/10 kV power transformers, no-load losses, short-circuit losses, load factor, power factor*

Введение. В настоящее время большое количество работ направлено на повышение надёжности работы силовых трансформаторов 35/10 кВ. В работе [1] представлена методика определения индекса технического состояния силовых трансформаторов с напряжением 35 кВ и выше. Методика заключается в оценке состояния отдельных узлов электроустановки и последующем расчёте общего показателя с учётом важности каждого элемента трансформатора. Схожее исследование реализовано в работе [2]. Автором представлена классификации всех возможных дефектов каждого узла трансформатора и выявлена их значимость для общего показателя индекса технического состояния по результатам экспертного опроса оперативного персонала электросетевых компаний. В работах [3; 4] представлены недостатки методики определения технического состояния силовых трансформаторов 35/10 кВ, исходя из физико-химического анализа трансформаторного масла. Авторами предлагается система более достоверной оценки за счёт введения нового показателя качества трансформаторного масла. Анализ статистики причин отказов силовых трансформаторов 35/10 кВ реализован в работе [5]. Отмечено, что наиболее частой причиной отказов является повреждение обмоток, составляющее 35% от общего числа отказов. Повреждение обмоток происходит по причинам механического износа изоляции и электрического воздействия в виде пробоев изоляции. На примере силовых трансформаторов 35/10 кВ электросетевой компании – филиала ПАО «Россети Юг» – «Волгоградэнерго» в работе [6] определены показатели их надёжности. Установлено, что средняя наработка на отказ силового трансформатора 35/10 кВ составляет 33 года, а вероятность безотказной работы за один год эксплуатации – 0,97 о.е.

Для повышения надёжности функционирования силовых трансформаторов 35/10 кВ и предупреждения их отказов в работе [7] предлагается оснащать электроустановки современными системами мониторинга, которые будут контролировать: текущее техническое состояние силового трансформатора, остаточный ресурс изоляции, конструктивные дефекты и время до планового ремонта. Отмечено, что данный подход позволит повысить надёжность работы силовых трансформаторов 35/10 кВ. Схожая система мониторинга предлагается в работе [8]. В свою очередь, в работе [9] произведён анализ методов диагностики силовых трансформаторов 35/10 кВ. Предложено использование частотных характеристик трансформаторов для контроля состояния изоляции силовых трансформаторов, что позволит обеспечить своевременное техническое обслуживание и ремонт электроустановок.

Во многих работах рассматриваются вопросы повышения защищённости трансформаторов 35/10 кВ от аварийных и ненормальных режимов. Например, в работах [10; 11; 12] для защиты от импульсных перенапряжений нейтрали силовых трансформаторов 35/10 кВ, возникающих при однофазных замыканиях на землю, предложено использовать ограничители перенапряжения. В работе [13] отмечено, что при коммутации нескольких параллельных кабельных линий 10 кВ с большой ёмкостью в последние годы фиксировались повреждения витковой изоляции силовых трансформаторов 35/10 кВ. Автором предложен ряд как организационных мероприятий, так и технических решений, позволяющих предотвратить выход из строя силового трансформатора 35/10 кВ.

Для снижения потерь в силовых трансформаторах 35/10 кВ с низкой загрузкой в работе [14] рассматривается эффективность использования одного трансформатора на двухтрансформаторных подстанциях на полную нагрузку. В работах [15; 16; 17] рассматривается возможность реконструкции 58 трансформаторных подстанций 35/10 кВ Луганской Народной Республики с заменой 87 силовых трансформаторов суммарной мощностью 255,53 МВА производства СССР на современные с целью снижения потерь. При расчётах потерь в качестве коэффициентов загрузки условно принимаются значения от 25 до 100%. В результате использования предложенного подхода удастся добиться технических потерь в силовых трансформаторах 35/10 кВ не более 17% от передаваемой мощности, а также снизить потери в 18,8–24,1 раза по сравнению с используемыми в настоящее время устаревшими силовыми трансформаторами.

При этом в большинстве работ не представлены сведения о текущей загрузке силовых трансформаторов 35/10 кВ, питающих электрические сети 10 кВ, и распределении потерь в них, исходя из фактических коэффициентов загрузки.

Цель исследования – анализ загрузки силовых трансформаторов 35/10 кВ Орловской области,

питающих сельские электрические сети, и распределения потерь в них.

Материалы и методы. Анализ загрузки силовых трансформаторов 35/10 кВ Орловской области был выполнен по данным оперативных замеров нагрузки электросетевой компании – филиала по «Россети Центр» – «Орёлэнерго» за 2022–2025 годы, которые осуществляются в июне и декабре (данные были предоставлены Службой электрических режимов).

Исходя из полной нагрузки силовых трансформаторов, протекающей на стороне 10 кВ, коэффициент загрузки силовых трансформаторов, $\beta_з$, %, был определён по формуле (1) [18]:

$$\beta_з = \frac{S_{факт.СТ}}{S_{ном}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $S_{факт.СТ}$ – фактическая мощность на стороне 10 кВ силового трансформатора, кВА; $S_{ном}$ – номинальная мощность силового трансформатора, кВА.

Средние загрузки конкретного рассматриваемого силового трансформатора за летние ($\beta_{з.ср.л.}$, %) и зимние ($\beta_{з.ср.з.}$, %) сезоны, а также среднегодовая загрузка ($\beta_{з.ср.г.}$, %) были определены по формулам (2–4):

$$\beta_{з.ср.л.} = \frac{\sum_{i=1}^{k} S_л}{k} \cdot 100\%, \quad (2)$$

$$\beta_{з.ср.з.} = \frac{\sum_{i=1}^{l} S_з}{l} \cdot 100\%, \quad (3)$$

$$\beta_{з.ср.г} = \frac{\beta_{з.ср.л.} + \beta_{з.ср.з.}}{2}, \quad (4)$$

где $S_л$ – мощность, протекающая на вводе 10 кВ в день летнего оперативного замера, кВА; $S_з$ – мощность, протекающая на вводе 10 кВ в день зимнего оперативного замера, кВА; k – количество рассмотренных летних сезонов, ед.; l – количество рассмотренных зимних сезонов, ед.

Для конкретного типа рассматриваемых трансформаторов, например, ТМН-2,5/35/10, средние значения коэффициентов загрузки в летний и зимний периоды, а также среднегодовой коэффициент загрузки были определены по формулам (5–7):

$$\beta_{з.ср.л.}^{ТМН-2,5/35/10} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \beta_{з.л.}^{ТМН-2,5/35/10}}{m}, \quad (5)$$

$$\beta_{з.ср.з.}^{ТМН-2,5/35/10} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \beta_{з.з.}^{ТМН-2,5/35/10}}{n}, \quad (6)$$

$$\beta_{з.ср.г.}^{ТМН-2,5/35/10} = \frac{\sum_{i=1}^{p} \beta_{з.ср.}^{ТМН-2,5/35/10}}{p}, \quad (7)$$

где $\beta_{з.л.}^{ТМН-2,5/35/10}$ – коэффициент загрузки для одного трансформатора ТМН-2,5/35/10, выявленный в день летнего оперативного замера, %; $\beta_{з.з.}^{ТМН-2,5/35/10}$ – коэффициент загрузки для одного трансформатора ТМН-2,5/35/10, выявленный в день зимнего оперативного замера, %; $\beta_{з.ср.}^{ТМН-2,5/35/10}$ – среднегодовой коэффициент загрузки для одного трансформатора ТМН-2,5/35/10, полученный с использованием формулы (4), %; m – количество летних коэффициентов загрузки, ед.; n – количество зимних коэффициентов загрузки, ед.; p – количество среднегодовых коэффициентов загрузки, ед.

По аналогичной методике были определены коэффициенты мощности в летний и зимний периоды, а также среднегодовые коэффициенты мощности, характерные для определённого типа трансформаторов.

Типы и количество рассмотренных силовых трансформаторов 35/10 кВ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Типы и количество силовых трансформаторов 35/10 кВ Орловской области

Тип трансформатора	Количество рассмотренных трансформаторов данного типа, ед.	Параметры трансформатора	
		Потери короткого замыкания, $\Delta P_{хх}$, Вт	Потери холостого хода, $\Delta P_{кз}$, Вт
ТМ-1/35/10	6	11600	2000
ТМ-1,6/35/10	30	16500	2750
ТМ-1,8/35/10	9	–	–
ТМ-2,5/35/10	30	23500	3900
ТМ-3,2/35/10	6	–	–
ТМ-4/35/10	5	33500	5300
ТМ-5,6/35/10	6	–	–
ТМ-6,3/35/10	4	46500	7500
ТМН-1,6/35/10	11	16500	2900
ТМН-2,5/35/10	31	23500	4100
ТМН-4/35/10	10	33500	5600
ТМН-6,3/35/10	4	46500	7500

С учётом данных, представленных в таблице 1, можно сделать вывод, что были рассмотрены замеры нагрузки на 152 силовых трансформаторах, которые установлены на 95 трансформаторных подстанциях 35/10 кВ. Для каждого из трансформаторов было рассмотрено по 8 оперативных замеров нагрузки за 4 года и определены коэффициенты загрузки, а также коэффициент мощности. Также следует отметить, что трансформаторы типа ТМН-2,5/35/10кВ являются наиболее широко распространёнными среди других типов, и их количество от общего парка трансформаторов составляет 20%. В свою очередь, доля силовых трансформаторов 35/10 кВ типов ТМ-1,6/35/10кВ и ТМ-2,5/35/10кВ от общего парка составляет по 19%.

В работе также предлагается рассмотреть соотношение потерь в силовых трансформаторах 35/10 кВ. Для этого с использованием источника* в таблицу 1 были внесены дополнения по потерям холостого хода и короткого замыкания для силовых трансформаторов 35/10 кВ, мощность которых является стандартной согласно ГОСТ 9680-77 «Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВ·А и более. Ряд номинальных мощностей». Параметры силовых трансформаторов 35/10 кВ типов ТМ-1,8/35/10, ТМ-3,2/35/10, ТМ-5,6/35/10 выявить не удалось, так как они являются устаревшими и выпускались в соответствии с ГОСТ 9680-61 «Трансформаторы (и автотрансформаторы) силовые мощностью от 10 кВА и выше. Ряды номинальных мощностей».

Оценка потерь электроэнергии в силовых трансформаторах 35/10 кВ, $W_{ЭЭ}$, кВт·ч, с использованием среднегодовых коэффициентов загрузки, была реализована с использованием формулы (8) [18]:

$$W_{ЭЭ} = P_{хх} \cdot t + P_{кз} \cdot \beta_{з.ср.г}{}^{2} \cdot \tau_{max}, \quad (8)$$

где $P_{хх}$ – паспортные данные потерь холостого хода в силовом трансформаторе, кВт; t – число часов в году, 8760 ч; $P_{кз}$ – паспортные данные потерь короткого замыкания в силовом трансформаторе, кВт; τ_{max} – время максимальных потерь мощности, ч.

Согласно СТО 56947007-29.240.01.271-2019 «Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». Методические указания по технико-экономическому обоснованию электросетевых объектов. Эталоны

* Неклепаев Б. Н., Крючков И. П. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования : учебное пособие для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1989. 608 с.

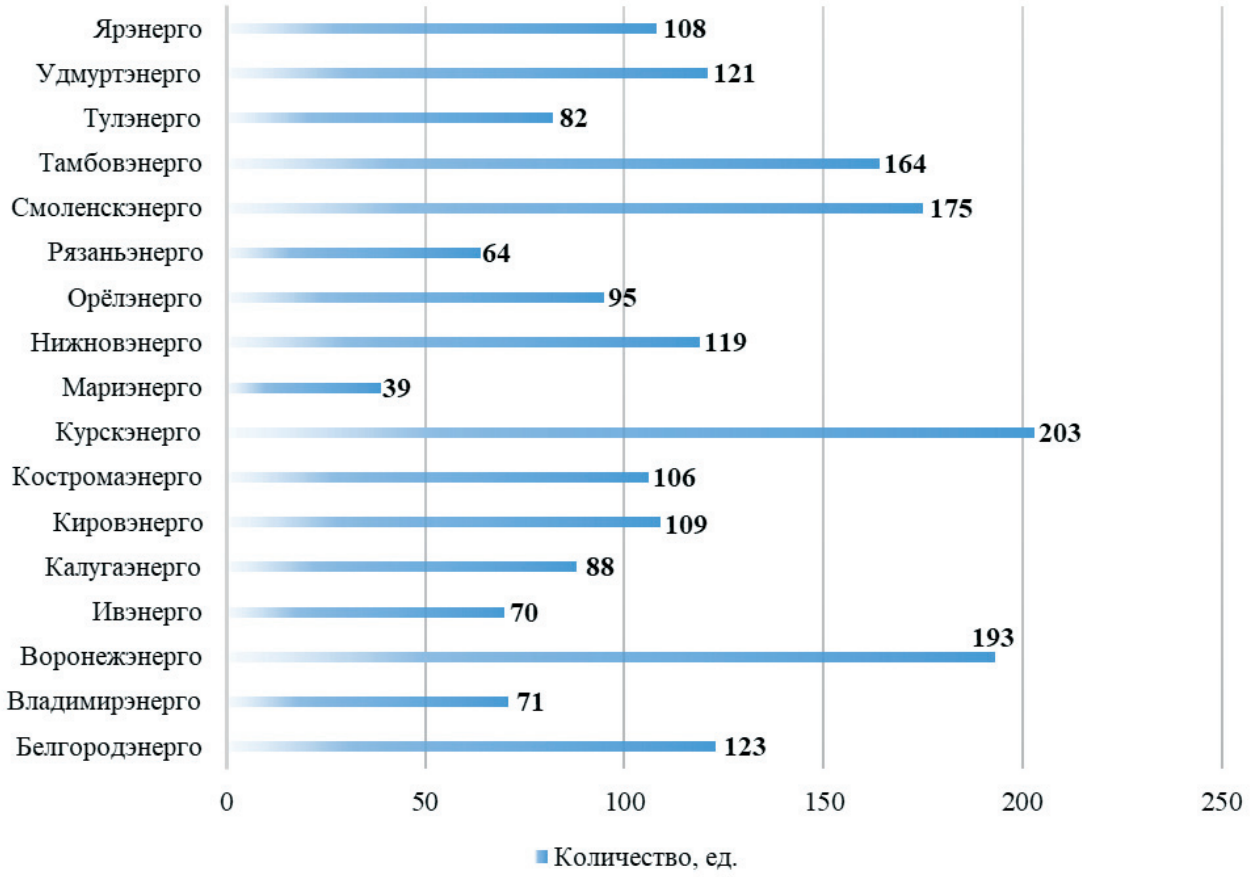

Рисунок 1 – Количество трансформаторных подстанций 35/10 кВ в регионах Центрального и Приволжского федеральных округов Российской Федерации

обоснований» вышеназванный показатель для Центральных регионов со смешанным характером нагрузки и заметной долей потребления в быту составляет 4650 часов.

Следует отметить, что в работе [19] представлены сведения о количестве трансформаторных подстанций 35/10 кВ в электросетевых компаниях Центрального и Приволжского федеральных округов Российской Федерации. Сведения о них представлены на рисунке 1.

Согласно данным рисунка 1, количество трансформаторных подстанций в регионах Центрального и Приволжского федеральных округов РФ отличается друг от друга незначительно. Установлено, что трансформаторная мощность на площадь региона для представленных субъектов страны изменяется в пределах от 38 до 294 кВА/км^2, количество подстанций – от 0,1 до 0,5 ед./ км^2, а трансформаторная мощность на одного жителя – от 3 до 5,6 кВА/человека [19].

В связи с этим можно сделать вывод, что результаты анализа загрузки силовых трансформаторов 35/10 кВ, питающих сельские электрические сети 10 кВ Орловской области, будут сопоставимы с результатами для других регионов Центрального и Приволжского федеральных округов РФ.

Рассмотрим результаты анализа загрузки силовых трансформаторов 35/10 кВ Орловской области, питающих сельские электрические сети, и распределение потерь в них.

Результаты и обсуждение. Коэффициенты загрузки и коэффициенты мощности силовых

Таблица 2 – Среднегодовые и сезонные коэффициенты загрузки и мощности силовых трансформаторов 35/10 кВ

Тип трансформатора	Показатель								
	В летний период			В зимний период			Среднегодовая		
	min	max	ср.	min	max	ср.	min	max	ср.
Коэффициенты загрузки трансформаторов, β, %									
ТМ-1/35/10	15	41	24	7	40	27	15	41	26
ТМ-1,6/35/10	5	34	17	4	40	20	8	40	19
ТМ-1,8/35/10	12	33	19	4	30	17	10	27	18
ТМ-2,5/35/10	4	69	25	4	77	26	5	73	25
ТМ-3,2/35/10	5	19	10	8	22	14	6	43	17
ТМ-4/35/10	21	23	22	14	38	26	14	38	25
ТМ-5,6/35/10	3	37	14	6	29	13	5	33	14
ТМ-6,3/35/10	15	18	16	17	31	22	16	23	19
ТМН-1,6/35/10	5	47	19	7	36	21	6	42	20
ТМН-2,5/35/10	6	54	19	10	42	22	9	46	20
ТМН-4/35/10	10	32	19	11	40	22	11	36	20
ТМН-6,3/35/10	10	33	20	7	29	20	9	28	20
Коэффициенты мощности трансформаторов, cos, φ									
ТМ-1/35/10	0,63	0,87	0,78	0,68	0,98	0,87	0,75	0,91	0,84
ТМ-1,6/35/10	0,59	0,95	0,84	0,71	0,99	0,89	0,74	0,99	0,87
ТМ-1,8/35/10	0,83	0,91	0,87	0,78	0,94	0,89	0,83	0,92	0,88
ТМ-2,5/35/10	0,78	0,99	0,89	0,6	0,98	0,9	0,52	0,98	0,9
ТМ-3,2/35/10	0,73	0,98	0,88	0,76	0,95	0,87	0,79	0,96	0,88
ТМ-4/35/10	0,91	0,92	0,93	0,79	0,98	0,89	0,79	0,95	0,88
ТМ-5,6/35/10	0,76	0,87	0,84	0,83	0,98	0,9	0,8	0,92	0,87
ТМ-6,3/35/10	0,74	0,91	0,84	0,89	0,92	0,91	0,82	0,92	0,88
ТМН-1,6/35/10	0,55	0,94	0,86	0,61	0,95	0,87	0,65	0,94	0,86
ТМН-2,5/35/10	0,55	0,99	0,77	0,65	0,98	0,9	0,53	0,98	0,87
ТМН-4/35/10	0,82	0,99	0,9	0,77	0,97	0,91	0,8	0,98	0,91
ТМН-6,3/35/10	0,72	0,97	0,86	0,74	0,97	0,85	0,73	0,97	0,86

Примечание: min – минимальные коэффициенты загрузки и мощности; max – максимальные коэффициенты загрузки и мощности; ср. – среднеарифметические коэффициенты загрузки и мощности.

трансформаторов, определённые по результатам летних и зимних замеров нагрузки, а также среднегодовые коэффициенты загрузки и мощности представлены в таблице 2.

Было выявлено, что для рассмотренных силовых трансформаторов номинальных мощностей от 1 МВА до 6,3 МВА в летний и зимний периоды минимальные коэффициенты загрузки изменяются от 3% до 22%, максимальные – от 18% до 77%, а среднеарифметические значения коэффициентов загрузки – от 10% до 27%. Минимальные среднегодовые значения коэффициентов загрузки составили от 5% до 16%, максимальные – 23–73%, а среднеарифметические – 14–26%.

В летний период времени минимальные коэффициенты мощности были равны 0,55–0,93, максимальные – 0,87–0,99, среднеарифметические – 0,77–0,93. В зимний период значения минимальных коэффициентов мощности составили 0,6–0,89, максимальных – 0,92–0,99, а среднеарифметические – 0,85–0,91. Минимальные среднегодовые значения коэффициентов мощности составили 0,52–0,83 о.е., максимальные – 0,91–0,99, а среднеарифметические – 0,84–0,91.

На рисунке 2 представлено распределение рассмотренных типов силовых трансформаторов 35/10 кВ номинальных мощностей от 1 МВА до 6,3 МВА по диапазонам загрузки. В целом среди рассмотренных 152 силовых трансформаторов 35/10 кВ загрузка 137 составляет не более 40%, или 90% от общего количества трансформаторов 35/10 кВ в регионе. Только для 5 типов силовых трансформаторов 35/10 кВ (ТМ-1/35/10, ТМ-2,5/35/10, ТМ-3,2/35/10, ТМН-1,6/35/10 и ТМН-2,5/35/10) среди 12 рассмотренных встречаются электроустановки с коэффициентами загрузки от 40% до 60%. При этом их доля составляет от 3% до 17% в каждом из рассматриваемых типов трансформаторов. Коэффициент загрузки от 60% до 80% встречается только для трансформаторов типа ТМ-2,5/35/10 и характерен для силовых трансформаторов подстанции 35/10 кВ «Звягинки», осуществляющей электроснабжение сельских территорий и новых многоэтажных домов, возводимых на окраине города Орла. Их доля составляет 3% от общего количества силовых трансформаторов 35/10 кВ рассматриваемого типа.

С использованием формулы (8) были определены потери в рассматриваемых типах силовых трансформаторах 35/10 кВ с номинальными мощностями от 1 МВА до 6,3 МВА, питающих сельские электрические сети 10 кВ Орловской области. Распределение потерь представлено на рисунке 3.

В рассматриваемых типах силовых трансформаторов 35/10 кВ доля потерь холостого хода (ΔW_{xx}, кВт·ч) составляет 83–90% от суммарных

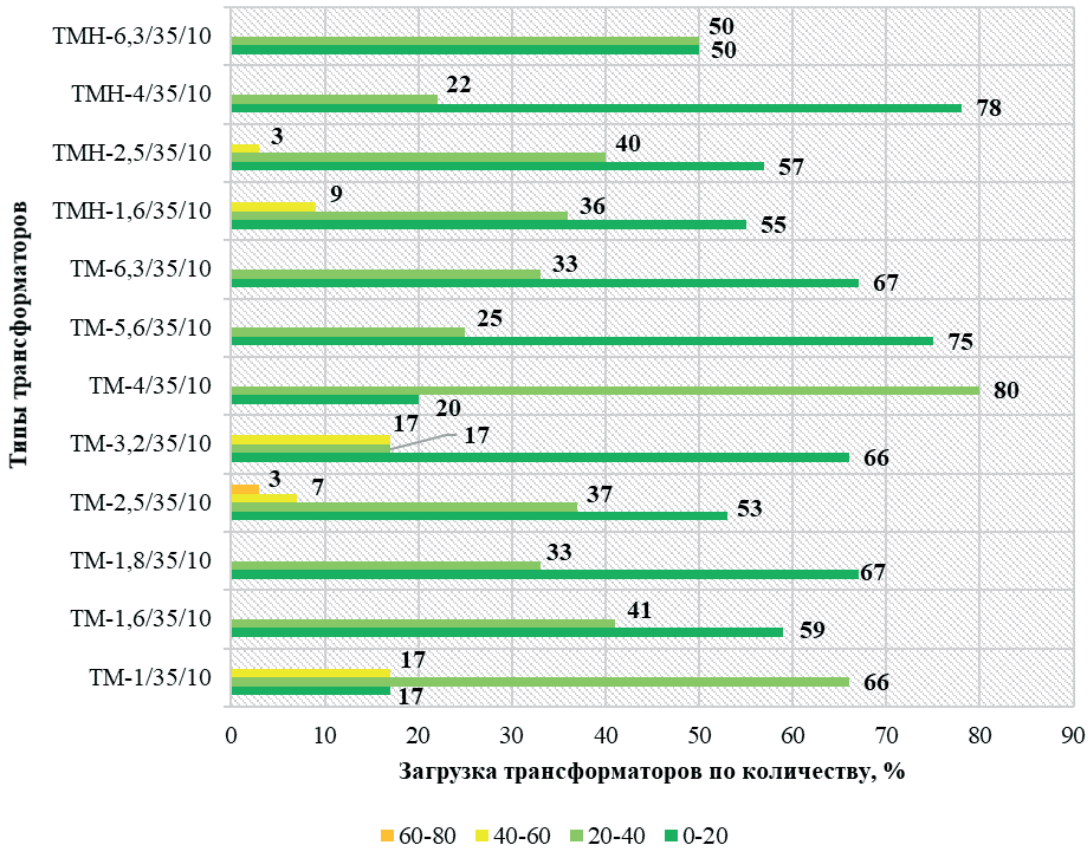

Рисунок 2 – Распределение типов трансформаторов по загрузке в процентах от общего количества

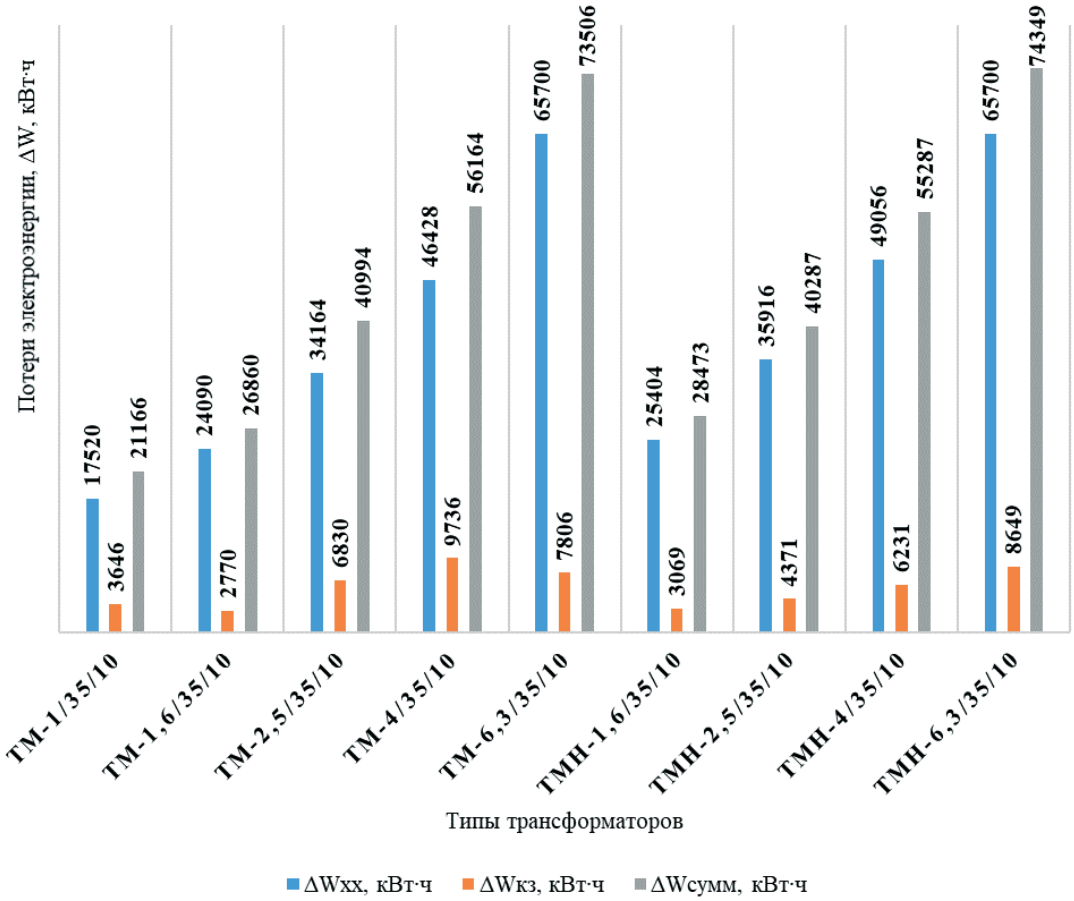

Рисунок 3 – Распределение потерь в силовых трансформаторах 35/10 кВ, питающих электрические сети 10 кВ Орловской области

потерь электроэнергии за год ($\Delta W_{сумм}$, кВт·ч). Для рассмотренных типов трансформаторов они составляют от 17520 кВт·ч до 65700 кВт·ч. При этом доля потерь короткого замыкания ($\Delta W_{кз}$, кВт·ч) составляет всего лишь 10–17% от суммарных потерь электроэнергии за год и для рассмотренных трансформаторов находится в диапазоне от 2770 кВт·ч до 9736 кВт·ч.

В целом потери холостого хода для рассмотренных типов силовых трансформаторов 35/10 кВ Орловской области превышают потери короткого замыкания в 4,8–8,7 раза.

Низкая загрузка силовых трансформаторов 35/10 кВ обусловлена рядом причин. Большинство трансформаторных подстанций 35/10 кВ проектировались в 1960–1980-е годы прошлого века для электроснабжения сельских коммунальных бытовых потребителей и сельскохозяйственных производств. При этом большинство предприятий в настоящее время не работает, а население сельской местности переезжает в городские центры. Согласно данным источника**, по состоянию на 2023 год 73% силовых трансформаторов находятся в эксплуатации от 25 до 50 лет, а 23% – свыше 50 лет.

Полученные результаты исследования коэффициентов загрузки и мощности силовых трансформаторов 35/10 кВ в совокупности с результатами анализа конфигурации и типов проводов воздушных линий электропередачи 10 кВ Орловской области [20] предполагается использовать для разработки компьютерной модели электрической сети 35/10 кВ в MATLAB Simulink и исследования режимов её работы.

Выводы. По результатам анализа загрузки и распределения потерь электроэнергии в силовых трансформаторах напряжением 35/10 кВ Орловской области можно сделать следующие выводы:

1. Силовые трансформаторы 35/10 кВ Орловской области, питающие сельские электрические сети 10 кВ, характеризуются низкими значениями коэффициентов загрузки, что приводит к значительным потерям электроэнергии. В филиале ПАО «Россети Центр» – «Орёлэнерго» 90% силовых трансформаторов работают с коэффициентом загрузки не более 40%. Составляющие потерь холостого хода для рассмотренных силовых трансформаторов 35/10 кВ в 4,8–8,7 раза превышают

** Виноградова А. В., Лансберг А. А., Виноградов А. В. Энергосистема Орловской области: обзор статистической информации. Орёл : ООО Полиграфическая фирма «Картуш», 2023. 360 с. EDN FPQAEF.

потери электроэнергии, вызванные составляющей короткого замыкания. Доля потерь электроэнергии от составляющей холостого хода для силовых трансформаторов 35/10 кВ номинальных мощностей от 1 МВА до 6,3 МВА составляет 83–90% от суммарных потерь электроэнергии за год.

2. Установлено, что трансформаторы типа ТМН-2,5/35/10 наиболее широко распространены и их количество от общего парка трансформаторов составляет 20%. Полученные результаты исследования коэффициентов загрузки и мощности силовых трансформаторов 35/10 кВ предполагается использовать для разработки компьютерной модели электрической сети 35/10 кВ в MATLAB Simulink и исследования режимов её работы.

Список источников

1. Антонов В. О. Расчет весовых коэффициентов для оценки индекса технического состояния силовых трансформаторов 35 кВ и выше // Вестник науки. 2024. Т. 3, № 2 (71). С. 711–725. ISSN 2712-8849. URL: https://www.вестник-науки.рф/article/13071 (дата обращения: 10.12.2025).

2. Терешко О. А. Оценка технического состояния силовых трансформаторов 35 кВ и выше // Энергоэксперт. 2018. № 4 (68). С. 74–76. EDN TFBTED.

3. Высогорец С. П., Васильев А. П. Оценка качества эксплуатационных масел силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 1 (166). С. 84–92. EDN QALOET.

4. Высогорец С. Поиск новых методов оценки качества эксплуатационных масел силовых трансформаторов напряжением 35-110 кВ. ПАО «МРСК Северо-Запада» // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № S2 (2). С. 39–45. EDN ZAQOLZ.

5. Антонов В. О. Анализ статистики технологических отказов функциональных узлов силовых трансформаторов 35 кВ и выше // Вестник науки. 2024. Т. 4, № 1 (70). С. 755–762. EDN WGPJDS.

6. Артемов А. А. Степень надежности электротехнического оборудования Волгоградской области: обзор силовых трансформаторов 110 кВ и 35 кВ // Современная техника и технологии. 2017. № 6 (70). С. 9. EDN YTXIYB.

7. Русов В. А. Управление эксплуатацией маслонаполненных и сухих силовых трансформаторов 6-35 кВ на основе результатов работы систем мониторинга // Энергоэксперт. 2021. № 2 (78). С. 54–59. EDN SHQUAZ.

8. Галяутдинова А. Р., Ившин И. В. Система онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов 35/6(10) кВ с применением интеллектуального анализа данных // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2025. № 4. С. 26–35. DOI 10.25791/pribor.4.2025.1575. EDN ZVJKXY.

9. Шулепов А. Н. Исследование диагностических признаков силовых трансформаторов 35/10 кВ и разработка средств их диагностирования под рабочим напряжением // Вестник Чувашского университета. 2012. № 3. С. 181–184. EDN PIEOCL.

10. Золотых А., Халилов Ф. Выбор ограничителей перенапряжений для защиты нейтрали силовых трансформаторов 6-35 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2013. № 4 (19). С. 72–79. EDN TXUARF.

11. Золотых А. Г., Халилов Ф. Х. Требования к защитным аппаратам нейтрали силовых трансформаторов 6-35 кВ // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 2 (171). С. 95–101. EDN QYOIED.

12. Еремич Я. Э., Пашичева С. А., Халилов Ф. Х., Карпов А. С. Защита нейтрали трансформаторов 6-35 кВ // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. № 1 (35). С. 37–47. EDN WMAKRX.

13. Дмитриев М. Повреждения силовых трансформаторов при коммутациях кабелей 6-35 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № 2 (35). С. 86–91. EDN VVKIQX.

14. Мусаев Т. А., Хабибуллин М. Н., Валеев И. М. [и др.] Разработка методики выбора силовых трансформаторов 35 кВ и выше для включения в план организационно-технических мероприятий по снижению потерь электроэнергии // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 1 (64). С. 76–80. EDN LZQODF.

15. Парсентьев О. С. Реновация понизительных подстанций в распределительных электрических сетях напряжением 35 кВ Северного региона ГУП ЛНР «РСК» энергоэффективными силовыми трансформаторами // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2024. № 6 (84). С. 66–96. EDN YDBTEW.

16. Парсентьев О. С. Реконструкция распределительных электрических сетей напряжением 35 кВ Лисичанского региона ГУП ЛНР «РСК» группами номинальной мощности энергоэффективных силовых трансформаторов // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2024. № 9 (87). С. 56–93. EDN AEKUTT.

17. Парсентьев О. С. Повышение технологичности распределительных электрических сетей напряжением 35 кВ Луганского региона ГУП ЛНР «РСК» энергоэффективными двухобмоточными силовыми трансфор-

маторами // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2024. № 4 (82). С. 77–116. EDN JBNMBL.

18. Виноградов А. В., Виноградова А. В., Букреев А. В., Лансберг А. А. Анализ загрузки и распределения потерь электроэнергии в силовых трансформаторах напряжением 6-10 кВ // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 67–75. DOI 10.26897/2687-1149-2023-6-67-75. EDN CZWQAV.

19. Виноградов А. В., Лансберг А. А., Сорокин Н. С. Характеристика электросетевых компаний по количеству и протяженности линий электропередачи, мощности подстанций // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 2 (47). С. 31–41. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-2-31-41. EDN AJQSZN.

20. Лансберг А. А., Виноградов А. В. Анализ конфигурации сельских электрических сетей 10 кВ // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71, № 3 (56). С. 35–43. DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-3-35-43. EDN UQRNJU.

References

1. Antonov V. O. Raschet vesovyh koefficientov dlya ocenki indeksa tekhnicheskogo sostoyaniya silovyh transformatorov 35 kV i vyshe // Vestnik nauki. 2024. T. 3, № 2 (71). S. 711–725. ISSN 2712-8849. URL: https://www.vestnik-nauki.rf/article/13071 (data obrashcheniya: 10.12.2025).

2. Tereshko O. A. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya silovyh transformatorov 35 kV i vyshe // Energoekspert. 2018. № 4 (68). S. 74–76. EDN TFBTED.

3. Vysogorets S. P., Vasil'ev A. P. Ocenka kachestva ekspluatacionnyh masel silovyh transformatorov napryazheniem 35–110 kV // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. 2013. № 1 (166). S. 84–92. EDN QALOET.

4. Vysogorets S. Poisk novyh metodov ocenki kachestva ekspluatacionnyh masel silovyh transformatorov napryazheniem 35-110 kV. PAO «MRSK Severo-Zapada» // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. 2016. № S2 (2). S. 39–45. EDN ZAQOLZ.

5. Antonov V. O. Analiz statistiki tekhnologicheskih otkazov funkcional'nyh uzlov silovyh transformatorov 35 kV i vyshe // Vestnik nauki. 2024. T. 4, № 1 (70). S. 755–762. EDN WGPJDS.

6. Artemov A. A. Stepen' nadezhnosti elektrotekhnicheskogo oborudovaniya Volgogradskoj oblasti: obzor silovyh transformatorov 110 kV i 35 kV // Sovremennaya tekhnika i tekhnologii. 2017. № 6 (70). S. 9. EDN YTXIYB.

7. Rusov V. A. Upravlenie ekspluataciej maslonapolnennyh i suhih silovyh transformatorov 6-35 kV na osnove rezul'tatov raboty sistem monitoringa // Energoekspert. 2021. № 2 (78). S. 54–59. EDN SHQUAZ.

8. Galyautdinova A. R., Ivshin I. V. Sistema onlajn-monitoringa i kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya silovyh maslonapolnennyh transformatorov 35/6(10) kV s primeneniem intellektual'nogo analiza dannyh // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2025. № 4. S. 26–35. DOI 10.25791/pribor.4.2025.1575. EDN ZVJKXY.

9. Shulepov A. N. Issledovanie diagnosticheskih priznakov silovyh transformatorov 35/10 kV i razrabotka sredstv ih diagnostirovaniya pod rabochim napryazheniem // Vestnik Chuvashskogo universiteta. 2012. № 3. S. 181–184. EDN PIEOCL.

10. Zolotykh A., Khalilov F. Vybor ogranichitelej perenapryazhenij dlya zashchity nejtrali silovyh transformatorov 6-35 kV // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. 2013. № 4 (19). S. 72–79. EDN TXUARF.

11. Zolotykh A. G., Khalilov F. H. Trebovaniya k zashchitnym apparatam nejtrali silovyh transformatorov 6-35 kV // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. 2013. № 2 (171). S. 95–101. EDN QYOIED.

12. Eremich Ya. E., Pashicheva S. A., Khalilov F. Kh., Karpov A. S. Zashchita nejtrali transformatorov 6-35 kV // Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. 2016. № 1 (35). S. 37–47. EDN WMAKRX.

13. Dmitriev M. Povrezhdeniya silovyh transformatorov pri kommutaciyah kabelej 6-35 kV // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. 2016. № 2 (35). S. 86–91. EDN VVKIQX.

14. Musaev T. A., Khabibullin M. N., Valeev I. M. [i dr.] Razrabotka metodiki vybora silovyh transformatorov 35 kV i vyshe dlya vklyucheniya v plan organizacionno-tekhnicheskih meropriyatij po snizheniyu poter' elektroenergii // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. 2021. № 1 (64). S. 76–80. EDN LZQODF.

15. Parsent'ev O. S. Renovaciya ponizitel'nyh podstancij v raspredelitel'nyh elektricheskih setyah napryazheniem 35 kV Severnogo regiona GUP LNR «RSK» energoeffektivnymi silovymi transformatorami // Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalya. 2024. № 6 (84). S. 66–96. EDN YDBTEW.

16. Parsent'ev O. S. Rekonstrukciya raspredelitel'nyh elektricheskih setej napryazheniem 35 kV Lisichanskogo regiona GUP LNR «RSK» gruppami nominal'noj moshchnosti energoeffektivnyh silovyh transformatorov // Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalya. 2024. № 9 (87). S. 56–93. EDN AEKUTT.

17. Parsent'ev O. S. Povyshenie tekhnologichnosti raspredelitel'nyh elektricheskih setej napryazheniem 35 kV Luganskogo regiona GUP LNR «RSK» energoeffektivnymi dvuhobmotochnymi silovymi transformatorami // Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalya. 2024. № 4 (82). S. 77–116. EDN JBNMBL.

18. Vinogradov A. V., Vinogradova A. V., Bukreev A. V., Lansberg A. A. Analiz zagruzki i raspredeleniya poter' elektroenergii v silovyh transformatorah napryazheniem 6-10 kV // Agroinzheneriya. 2023. T. 25, № 6. S. 67–75. DOI 10.26897/2687-1149-2023-6-67-75. EDN CZWQAV.

19. Vinogradov A. V., Lansberg A. A., Sorokin N. S. Harakteristika elektrosetevyh kompanij po kolichestvu i protyazhennosti linij elektroperedachi, moshchnosti podstancij // Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. 2022. T. 69, № 2 (47). S. 31–41. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-2-31-41. EDN AJQSZN.

20. Lansberg A. A., Vinogradov A. V. Analiz konfiguracii sel'skih elektricheskih setej 10 kV // Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. 2024. T. 71, № 3 (56). S. 35–43. DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-3-35-43. EDN UQRNJU.

Сведения об авторе

Александр Александрович Лансберг – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», spin-код: 5921-1955.

Information about the author

Aleksandr A. Lansberg – postgraduate student, Research Assistant at the Laboratory of Power Supply, Electrical Equipment and Renewable Energy, Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM", spin-code: 5921-1955.