

УДК 621.314

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМ СРОКОМ СЛУЖБЫ

Ю.Б. КАЗАКОВ¹, В.Я. ФРОЛОВ², А.В. КОРОТКОВ²

¹ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Иваново, Россия

²ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: elmash@em.ispu.ru, frolov.eed@gmail.com, kav009@ya.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время погрешности определения потерь основного хода трансформатора значительны, так как они рассчитываются по упрощенным методикам. Необходима реальная оценка этих потерь по результатам испытаний и выработка необходимых рекомендаций.

Материалы и методы: Использовались результаты испытаний многочисленных трансформаторов. Результаты обрабатывались методами теории вероятностей и математической статистики с использованием корреляционного и регрессионного анализов.

Результаты: Предложена модель для определения фактического значения мощности потерь холостого хода группы трансформаторов распределительных электрических сетей с высшим напряжением 6–10 кВ в зависимости от срока эксплуатации.

Выводы: Результаты измерений мощности потерь холостого хода нескольких групп трансформаторов и сравнение их с расчетными значениями показали, что мощность потерь холостого хода группы трансформаторов разных сроков службы может быть с высокой степенью точности определена расчетным путем по предложенной методике. Установлено, что предложенная модель оценки может быть использована для определения реального значения мощности потерь холостого хода группы трансформаторов с различным сроком эксплуатации.

Ключевые слова: электрические сети, технологические потери электроэнергии, потери холостого хода трансформаторов, расчет мощности потерь.

METHODS TO DETERMINE LOST EFFECT OF IDLE RUN OF TRANSFORMERS OF DIFFERENT DURABILITY

Y.B. KAZAKOV¹, V. FROLOV², A.V. KOROTKOV²

¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia

²St. Petersburg State Politechnical University, St. Petersburg Russia

E-mail: elmash@em.ispu.ru, frolov.eed@gmail.com, kav009@ya.ru

Abstract

Background: Now days errors to determine loses of transformers are considerable as they are calculated according to simple methods. Real estimation of losses and development of appropriate recommendations are necessary.

Materials and methods: The test results of numerous transformers were used. The results were processed by the methods of theory of probability and correlation and regression analysis.

Results: A model to determine actual value of lost effect of idle run of group of transformers of different durability with the highest voltage of 6–10 kV was developed.

Conclusions: The results of measurement of power losses of several groups of transformers were compared with the results of calculated values of the power loss. The results showed that lost effect of idle run of transformers of different durability is to be determined with high accuracy by calculation using the proposed method. It was shown that the proposed evaluation model can be used to determine actual value of losses of idle run of group of transformers depending on their mechanic life.

Key words: power grids, technological losses of electricity, losses of idle transformers, calculation of power losses.

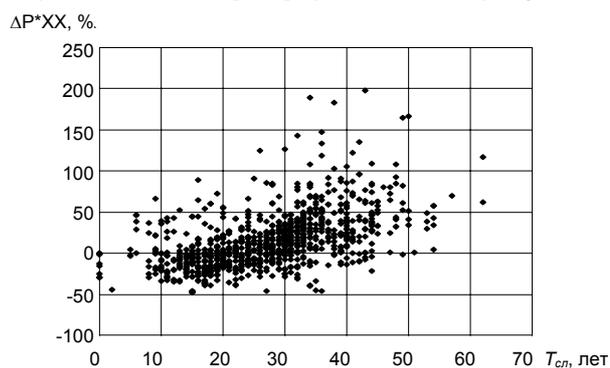
Одной из важнейших задач эксплуатации электрических сетей является задача доказательного расчета норматива технологических потерь электроэнергии (далее – Норматив), определяющего величину тарифа на передачу электроэнергии. В [1] в практику проведения расчетов введены принципы расчета Норматива в электрических сетях РФ и определен перечень показателей. В материалах [1] указано, что «при установлении нормативов потерь электроэнергии в электрических сетях может учитываться техни-

ческое состояние объектов электросетевого хозяйства на основании обследований и расчетов».

В распределительных электрических сетях с высшим напряжением 6–10 кВ значительной составляющей технологических потерь электроэнергии являются потери холостого хода (ХХ) трансформаторов. Число трансформаторов в городских электрических сетях (ГЭС) даже некрупных городов исчисляется сотнями и тысячами. В расчетах величина активной мощности потерь трансформаторов $\Delta P_{ХХ}$ принимается, как правильная, равной паспортному значению потерь

$\Delta P_{XX.PАСП}$, хотя в реальных условиях паспортное значение $\Delta P_{XX.PАСП}$ не всегда соответствует реальному значению $\Delta P_{XX.PЕАЛ}$ и, как показывает опыт эксплуатации трансформаторов, изменяется в процессе эксплуатации трансформатора. Срок службы трансформаторов в электрических сетях городов Центра европейской части России может достигать 30 лет и более. Ошибка в определении ΔP_{XX} на 1 кВт приводит к ошибке в расчетах отпуска электроэнергии на величину порядка 10 тыс. кВт·ч в год. Цена ошибки определения ΔP_{XX} возрастает при увеличении единичной мощности трансформатора, числа трансформаторов в сети и срока их службы.

Количественная оценка величины $\Delta P_{XX.PЕАЛ}$ для трансформаторов распределительных электрических сетей с высшим напряжением 6–10 кВ предложена в [2, 3] по результатам измерений электрических характеристик более 1000 трансформаторов, произведенных как в России, так и за рубежом. Результаты измерений и анализа основаны на получении *обобщенных характеристик* изменения ΔP_{XX} трансформаторов в процессе эксплуатации. Выводы справедливы для трансформаторов разных типоразмеров (от 20 до 630 кВ·А), имеющих разные сроки службы. Результаты измерений потерь ХХ трансформаторов по данным [2, 3] приведены на рисунке.



Потери холостого хода трансформаторов распределительных сетей Ивановской области по результатам измерений

Поиск статистических регрессионных моделей по полученным данным в виде зависимостей $\Delta P_{XX}^*(T_{сл}) = \frac{\Delta P_{XX.PЕАЛ} - \Delta P_{XX.PАСП}}{\Delta P_{XX.PАСП}}$ проводился для линейной и квадратичной функций. Установлено, что наилучшая модель может быть представлена в виде функции

$$\Delta P_{XX}^*, \% = -15,171 + 0,576T_{сл} + 0,0175T_{сл}^2 \quad (1)$$

Установлено также, что при слабой нелинейности полученной функции в реальном диапазоне $T_{сл}$ при проведении инженерных расчетов зависимость (1) может быть заменена двумя участками с линейной зависимостью $\Delta P_{XX}^* = f(T_{сл})$:

– для трансформаторов со сроком службы до 20 лет допустимо принимать значения потерь холостого хода равными паспортным значениям;

– для трансформаторов со сроком службы более 20 лет потери холостого хода возрастают в среднем с интенсивностью 1,75 % в год (от паспортного значения).

Подобные выводы сделаны авторами [4].

Результаты работ [2, 3 и 4] использовались при расчетах нормативов потерь в соответствии с [5]: «Допускается для силовых трансформаторов (автотрансформаторов) потери мощности ХХ определять с учетом их технического состояния и срока службы путем измерений этих потерь методами, применяемыми на заводах-изготовителях при установлении паспортных данных трансформаторов (автотрансформаторов)». То есть количественная оценка величины $\Delta P_{XX.PЕАЛ}$ для трансформаторов распределительных электрических сетей с высшим напряжением 6–10 кВ может использоваться при определении норматива потерь для предприятия.

В инструкции [5] указывается, что целесообразно включать протоколы измерений ΔP_{XX} , полученные путем измерений этих потерь методами, применяемыми на заводах-изготовителях. Очевидно, что ежегодное проведение измерений потерь всех трансформаторов из-за их большого количества нереально. Поэтому в процессе работ по нормированию потерь электроэнергии в сетях должны проводиться выборочные измерения в целях сравнения результатов замеров реальных значений ΔP_{XX} с результатами расчетов по используемой методике, т.е. с результатами приведения паспортных значений ΔP_{XX} к реальным значениям в условиях эксплуатации. Результаты таких измерений должны подтверждать (или опровергать) возможность использования предложенной методики расчета $\Delta P_{XX.PЕАЛ}$ для определения мощности потерь в трансформаторах с учетом их технического состояния и срока службы.

Нами проведен анализ возможности использования результатов исследований [2, 3] и предлагаемой методики расчета мощности потерь ХХ трансформаторов при расчетах норматива потерь электроэнергии в электрических сетях в соответствии с требованиями инструкции [1].

Проведены выборочные измерения мощности потерь ХХ $\Delta P_{XX.PЕАЛ}$ действующих трансформаторов сетей 6–10 кВ и сравнение полученных в результате измерений значений с расчетными значениями $\Delta P_{XX.PАСЧ}$, полученными при пересчете паспортных значений $\Delta P_{XX.PАСП}$ по методике [2, 3], которая учитывает изменение величины мощности потерь ХХ в процессе эксплуатации трансформатора. Измерения мощности потерь ХХ проводились в соответствии с ГОСТ у трансформаторов, для которых проведение таких измерений оказалось возможным в реальных условиях эксплуатации. Результаты измерений $\Delta P_{XX.PЕАЛ}$ и их сравнение с паспортными $\Delta P_{XX.PАСП}$ и расчетными $\Delta P_{XX.PЕАЛ}$ значениями приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты выборочных измерений потерь XX трансформаторов распределительных сетей 6–10 кВ и их сравнение с паспортными расчетными значениями

№ п/п	Тип трансформатора	Год изготовления	Зав. номер трансформатора	ΔP_{XX} , Вт		
				Паспортные	Реальные	Расчетные
1	2	3	4	5	6	7
1 участок сети						
1	ТМ-250	1976	7913	790	1200	970
2	ТМ-250	1976	7132	785	1370	964
3	ТМ-400	1978	2379	1280	1260	1526
4	ТМ-400	1978	2397	1200	1300	1431
5	ТМ-400	1978	57642	1230	1250	1467
6	ТМ-400	1978	57706	1330	1380	1586
7	ТМ-400	1978	54767	1200	1400	1431
8	ТМ-400	1978	53574	1230	1420	1467
9	ТМ-250	1974	490877	955	1040	1206
0	ТМ-250	1969	305163	1007	1050	1359
10	ТМ-250	1989	1218268	474	586	474
12	ТМ-250	1985	1031593	750	816	803
13	ТМ-250	1991	43422	650	715	715
14	ТМ-250	1991	23644	750	720	720
15	ТМ-400	1977	2045	1440	1440	1742
16	ТМ-400	1977	1979	1280	1380	1549
17	ТМ-250	1987	975483	900	780	932
18	ТМ-250	1984	963568	720	725	783
19	ТМ-250	1975	550081	870	920	1083
20	ТМ-250	1976	735132	870	860	1068
21	ТМ-250	1977	678949	830	860	1004
22	ТМ-250	1977	678944	710	970	859
23	ТМ-250	1971	390061	1007	1000	1324
24	ТМ-250	1971	390318	1007	1230	1324
25	ТМ-250	1970	358345	1007	1063	1342
26	ТМ-250	1970	358344	1022	1004	1362
27	ТМ-250	1977	678970	785	1700	950
28	ТМ-250	1973	447391	947	1410	1212
	Всего по 1 участку сети				30849	32652
	ср. год изг.	1978				
	ср. возраст	31				
	Погрешность расчетной оценки, %					+ 5,85
2 участок сети						
29	ТМ-250	1970	38823	820	1140	1020
30	ТМ-250	1972	1273	820	998	990
31	ТМ-250	1973	452588	820	902	980
32	ТМ-250	1975	580981	820	998	950
33	ТМ-250	1976	366	820	909	930
34	ТМ-250	1979	734391	820	999	890
35	ТМ-250	1980	797073	820	841	880
36	ТМ-250	1992	923В500	820	959	820
37	ТМ-250	1993	902284	820	879	820
	Всего по 2 участку сети				8625	8280
	ср. год изг.	1979				
	ср. возраст	25				
	Погрешность расчетной оценки, %					- 4,00

№ п/п	Тип трансформатора	Год изготовления	Зав. номер трансформатора	ΔP_{XX} , Вт		
				паспортные	реальные	расчетные
1	2	3	4	5	6	7
3 участок сети						
38	ТСМА-320	1962	2022	1060	2000	1450
39	ТМ-160	1969	231215	540	1000	672
40	ТМ-250	1979	534792	1050	1280	1124
41	ТМ-400	1989	46836	1080	1650	1080
Всего по 3 участку сети					5930	4325
ср. год изг.		1975				
ср. возраст		28				
Погрешность расчетной оценки, %						-27,1

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что реальные значения потерь холостого хода для отдельных трансформаторов могут оказаться как выше, так и ниже расчетных значений, определяемых по предлагаемой методике. При этом чем больше количество трансформаторов в группе, тем ближе значения $\sum \Delta P_{XX.PEAL}$ и $\sum \Delta P_{XX.PASC}$ для рассматриваемой группы.

По группам трансформаторов участков сетей сумма значений реальных потерь $\sum \Delta P_{XX.PEAL}$ для разных групп оказалась как выше, так и ниже суммы расчетных значений $\sum \Delta P_{XX.PASC}$, определяемых по предлагаемой методике учета срока эксплуатации трансформатора (табл. 1).

Результаты сравнения потерь $\sum \Delta P_{XX.PEAL}$ и $\sum \Delta P_{XX.PASC}$ по всем трансформаторам, попавшим в выборку на трех участках сетей, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты сравнения потерь $\sum \Delta P_{XX.PEAL}$ и $\sum \Delta P_{XX.PASC}$ по трансформаторам трех участков сетей

№ участка сети	ΔP_{XX} , Вт	
	Реальные	Расчетные
1. г. Иваново	30849	32652
2. г. Шуя	8625	8280
3. г. Юрьеvec	5930	4325
Всего по трем участкам	45404	45257
Погрешность расчетной оценки, %		-0,32

Полученный при сравнении указанных величин результат можно отнести, скорее всего, к случайным – различие $\sum \Delta P_{XX.PEAL}$ и $\sum \Delta P_{XX.PASC}$ составило всего **-0,32 %** по отношению к $\sum \Delta P_{XX.PASC}$. Однако этот результат дает основание однозначно утверждать, что сравниваемые величины близки по значению.

Таким образом, предложенная методика расчета мощности потерь $\sum \Delta P_{XX}$ позволяет с высокой точностью определить мощность потерь $\sum \Delta P_{XX}$ группы трансформаторов с учетом их паспортных значений и срока эксплуатации (отдельно для каждого трансформатора). Точность расчетов повышается с увеличением числа трансформаторов в группе, где проводится расчет и анализ фактического значения мощности потерь $\sum \Delta P_{XX}$ трансформаторов.

Список литературы

1. Об организации в Министерстве промышленности и энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Приказ Минпромэнерго России от 04 октября 2005 г. № 267.
2. Казаков Ю.Б., Козлов А.Б., Коротков В.В. Учет изменения потерь холостого хода трансформаторов в период срока службы при расчете потерь в распределительных сетях // Электротехника. – 2006. – № 5. – С. 11–16.
3. Коротков В.В., Козлов А.Б., Коротков А.В. Количественная оценка зависимости потерь холостого хода силовых трансформаторов от срока эксплуатации // Повышение эффективности работы энергосистем: тр. ИГЭУ. Вып. VIII / под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарин. – Иваново, 2007. – С. 351–356.
4. Балабин А.А., Волчков Ю.Д. Анализ составляющих потерь электроэнергии в силовых трансформаторах ОАО «Орелэнерго» // Энерго- и ресурсосбережение XXI век.: матлы IV Междунар. науч.-практич. интернет-конф. – Орел: ОрелГТУ, 2006. – С. 112–115.
5. Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Приказ Минэнерго РФ от 30 декабря 2008 г. № 326. Зарегистрирован в Минюсте РФ 12 февраля 2009 г. № 13314.

References

1. Ob organizatsii v Ministerstve promyshlennosti i energetiki Rossiyskoy Federatsii raboty po utverzhdeniyu normativov tekhnologicheskikh poter' elektroenergii pri ee peredache po elektricheskim setyam [On organization of work in Ministry of Industry and Power of Russian Federation to confirm specification of technological losses of electricity], in Prikaz Minpromenergo Ros-sii ot 04 oktyabrya 2005 g. № 267.
2. Kazakov, Yu.B., Kozlov, A.B., Korotkov, V.V. Uchet izmeneniya poter' kholostogo khoda transformatorov v period stroka sluzhby pri raschete poter' v raspredelitel'nykh setyakh [Recording of losses changes of idle run of transformers in tenure

of employment of distributive electrical grids], in *Elektrotehnika*, 2006, issue 5, pp. 11–16.

3. Korotkov, V.V., Kozlov, A.B., Korotkov, A.V. Kolichestvennaya otsenka zavisimosti poter' kholostogo khoda silovykh transformatorov ot sroka ekspluatatsii [Quality estimation of dependency of losses of idle run of power transformers on their durability], in *Povyshenie effektivnosti raboty energosistem, Trudy IGEU*, 2007, issue 8, pp. 351–356.

4. Balabin, A.A., Volchkov, Yu.D. Analiz sostavlyayushchikh poter' elektroenergii v silovykh transformatorakh OAO

«Orelenergo» [Analysis of losses components in power transformers of OJSC «Orelenergo»], in *Energo- i resursosberezhenie XXI vek*, 2006, pp. 112–115.

5. Ob organizatsii v Ministerstve energetiki Rossiyskoy Federatsii raboty po utverzhdeniyu normativov tekhnologicheskikh poter' elektroenergii pri ee peredache po elektricheskim setyam [On organization of work in Ministry of Power of Russian Federation to confirm specification of technological losses of electricity], in *Prikaz Minenergo RF ot 30 dekabrya 2008 g. № 326. Zaregistrirovan v Minyuste RF 12 fevralya 2009 g. № 13314.*

Казаков Юрий Борисович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики,
телефон (4932) 26-97-06,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Фролов Владимир Яковлевич,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и электротехнологии,
e-mail: frolov.eed@gmail.com

Коротков Александр Владимирович,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
аспирант,
e-mail: kav009@ya.ru