

УДК 621.314

Статистический метод оценки энергетической эффективности работы трансформаторов городских сетей

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: Энергетическая эффективность работы городских сетей определяется с погрешностью, обусловленной, в том числе, погрешностью задания потерь холостого хода в трансформаторах городских сетей. В связи с этим целесообразны разработка уточненного метода задания мощности потерь трансформаторов для повышения точности оценки показателей их энергетической эффективности и планирование мероприятий по энергосбережению.

Материалы и методы: Используются результаты испытаний большой группы трансформаторов, обработанные с применением методов теории вероятностей и математической статистики, корреляционного, регрессионного и дисперсионного анализа.

Результаты: Разработана статистическая математическая модель, на основании которой предложены метод и алгоритм его реализации для оценки энергетической эффективности работы трансформаторов распределительных электрических сетей 6–10 кВ с различными сроками эксплуатации.

Выводы: Сравнение результатов измерений и расчетов мощности потерь холостого хода группы трансформаторов подтверждает высокую степень точности предложенного метода. Предложенный метод и алгоритм его реализации могут быть использованы для оценки и прогнозирования показателей энергетической эффективности силовых трансформаторов и при разработке мероприятий по замене трансформаторов в условиях низкого уровня мониторинга их состояния и характеристик.

Ключевые слова: потери холостого хода трансформаторов, расчет мощности потерь, энергетическая эффективность.

Statistical method of assessing energy efficiency of urban network transformers

Yu.B. Kazakov¹, V.Ya. Frolov², A.V. Korotkov²

¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

²St. Petersburg State Polytechnical University, St. Petersburg, Russian Federation

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

Abstract

Background: The energy efficiency of urban networks is determined with an uncertainty caused, inter alia, by the no-load loss setting error in urban network transformers. Therefore, it is necessary to develop a more precise technique of setting the transformer loss power in order to increase the accuracy of assessing transformer energy efficiency parameters and planning energy-saving measures.

Materials and methods: The study is based on the results of testing a large group of transformers and processing the obtained data by the methods of the probability theory and mathematical statistics, correlation, regression and variance analysis.

Results: We have developed a statistical mathematical model on the basis of which we propose a method and an algorithm of its implementation to assess the energy efficiency of distribution transformers of 6–10 kV electric networks with different lifetimes.

Conclusions: Comparison of measurements and calculations of no-load loss power of transformers confirms a high degree of accuracy of the method developed. The proposed method and its implementing algorithm can be used to estimate and forecast the energy efficiency of power transformers and to plan the measures for replacing transformers if their performance and characteristics are not monitored properly.

Key words: no-load losses of transformers, loss power calculation, energy efficiency.

Важнейшей задачей при эксплуатации городских электрических сетей как электротехнических комплексов является задача корректного определения энергетической эффективности и долгосрочного планирования показателей работы всего комплекса и отдельных составляющих.

Основными показателями энергетической эффективности работы электротехнического комплекса городских распределительных сетей (ЭК ГРС) являются фактические, технологические и нормативные потери электрической энергии, значения которых используются как при определении величины тарифа на передачу электрической энергии, так и для разработки

мероприятий по повышению эффективности работы сетевых предприятий.

В ЭК ГРС с высшим напряжением 6–10 кВ значительной составляющей технологических потерь электроэнергии являются потери холостого хода (ХХ) силовых трансформаторов (СТ). Число СТ в распределительных электрических сетях даже некрупных городов исчисляется тысячами. При расчетах потерь электрической энергии и планировании мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности величина активной мощности потерь холостого хода (МПХХ) СТ ΔP_{XX} принимается, как правило, равной паспортному значению потерь $\Delta P_{XX,ПАСП}$, хотя в реальных условиях паспортное значение $\Delta P_{XX,ПАСП}$ не всегда соответствует реальному значению $\Delta P_{XX,РЕАЛ}$. Как показывает опыт эксплуатации СТ, величина ΔP_{XX} изменяется в процессе эксплуатации. Неучет такого изменения величины ΔP_{XX} снижает точность определения показателей энергетической эффективности и может привести к ее неверной оценке и ошибкам при планировании эффекта от мероприятий по замене СТ при значительных сроках службы $T_{СЛ}$ в электрических сетях.

Количественная оценка величины $\Delta P_{XX,РЕАЛ}$ для СТ распределительных электрических сетей с высшим напряжением 6–10 кВ проведена по результатам измерений электрических характеристик более 1000 трансформаторов, произведенных как в России, так и за рубежом [1, 2]. Измерения проведены для СТ разных типоразмеров (от 20 до 630 кВ·А) со сроками службы от 0 до 50–60 лет и более. Результаты измерений МПХХ СТ в [1, 2] представлены в виде относительных значений

$$\Delta P_{XX}^*(T_{СЛ}), \% = \frac{\Delta P_{XX,РЕАЛ} - \Delta P_{XX,ПАСП}}{\Delta P_{XX,ПАСП}} \cdot 100\%.$$

На основе полученных в результате экспериментальных исследований данных разрабатывались регрессионные математические модели изменения МПХХ СТ в процессе эксплуатации.

При разработке метода определения МПХХ СТ было показано, что влияние многочисленных факторов на величину МПХХ СТ за исключением срока службы незначительно. В соответствии с этим, сделан вывод о возможности анализа общей выборки данных при использовании единственного (основного) фактора – срока эксплуатации трансформатора, что, в частности, соответствует выводам [3]. Исследования проведены по полной выборке данных в предположении гипотезы о нормальном законе распределения и уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Для подтверждения наличия связи между $\Delta P_{XX}^*(T_{СЛ}), \%$ и $T_{СЛ}$ проведен корреляционный анализ данных, приведенных в [1, 4]. Значение

коэффициента корреляции $r = 0,42$ свидетельствует о наличии связи, а его низкое значение объясняется большим разбросом данных. Коэффициент корреляции в соответствии с t -критерием Стьюдента является статистически значимым при выбранном уровне значимости.

Для разработки математической модели, описывающей изменение $\Delta P_{XX}^*, \%$, в зависимости от $T_{СЛ}$ ($\Delta P_{XX}^* = f(T_{СЛ})$), проведен регрессионный анализ. В качестве типов искомым уравнений линий регрессии рассматривались линейная, степенная, экспоненциальная, гиперболическая, показательная, полиномиальная (квадратичная) и логарифмическая функции.

Определение коэффициентов уравнений линий регрессии проведено по методу наименьших квадратов. Статистическая значимость этих коэффициентов определена по t -критерию Стьюдента. Оценка точности определения характера зависимостей и уравнений линий регрессии проводилась по значению коэффициента детерминации R^2 . Адекватность регрессионных моделей экспериментальным данным проверялась с помощью F -критерия Фишера.

Сравнительный анализ полученных математических моделей позволяет сделать вывод о том, что в качестве адекватной и статистически значимой математической модели, наиболее точно описывающей влияние $T_{СЛ}$ на $\Delta P_{XX}^*, \%$, должна быть выбрана аппроксимирующая модель в виде степенного уравнения $\Delta P_{XX}^*(T_{СЛ}) = -25,3201 + T_{СЛ}^{1,0935}$, (1) в силу того, что:

- все коэффициенты уравнения являются статистически значимыми;
- коэффициент детерминации R^2 достигает наибольшего значения из числа статистически значимых моделей;
- полученная модель является адекватной по отношению к экспериментальным данным.

Результаты приведенных разработок послужили основой для разработки метода расчета МПХХ группы СТ со значительными сроками эксплуатации.

Все полученные уравнения регрессионных моделей различных видов характеризуются крайне незначительной нелинейностью. Незначительная нелинейность выбранной математической модели в исследуемом диапазоне $T_{СЛ}$ показала возможность замены функции (1) двумя участками при $T_{СЛ} \leq 20$ и $T_{СЛ} > 20$ с линейной зависимостью $\Delta P_{XX}^* = f(T_{СЛ})$ без потери точности описания. Проведен регрессионный и дисперсионный анализ экспериментальных данных по этим участкам, в результате которого установлено:

- 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).

Полученный метод определения МПХХ СТ и его сравнение со степенной математической моделью, наиболее точно описывающей зависимость $\Delta P_{XX}^* = f(T_{СЛ})$, в графическом виде представлен на рис. 1.

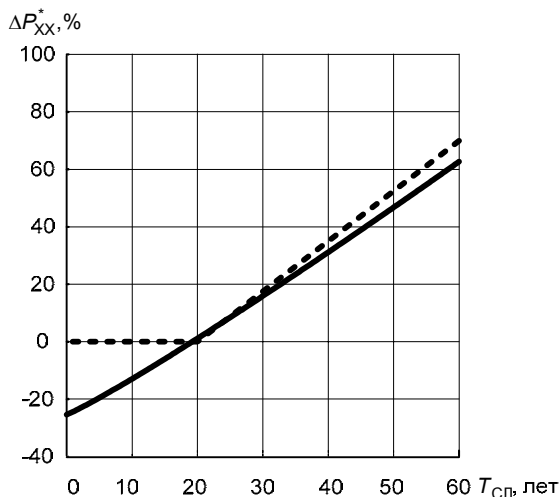


Рис. 1. Графическое представление метода определения МПХХ СТ и его сравнение с разработанной степенной математической моделью (1): — предложенный метод; — разработанная математическая модель

Выборочные измерения МПХХ $\Delta P_{XX.РЕАЛ}$ действующих СТ сетей 6–10 кВ и сравнение полученных в результате измерений значений с расчетными значениями $\Delta P_{XX.РАСЧ}$, полученными при пересчете паспортных значений $\Delta P_{XX.ПАСП}$ по предложенному методу [4], подтвердили возможность определения $\Delta P_{XX.РЕАЛ}$ для группы СТ расчетным путем с высокой степенью точности. При этом точность расчетов повышается с увеличением числа трансформаторов в группе.

Для практического использования предложенного метода разработан алгоритм его применения, позволивший внедрить этот метод в существующий программный комплекс по расчету потерь электрической энергии. Алгоритм применения метода оценки энергетической эффективности работы СТ представлен на рис. 2.

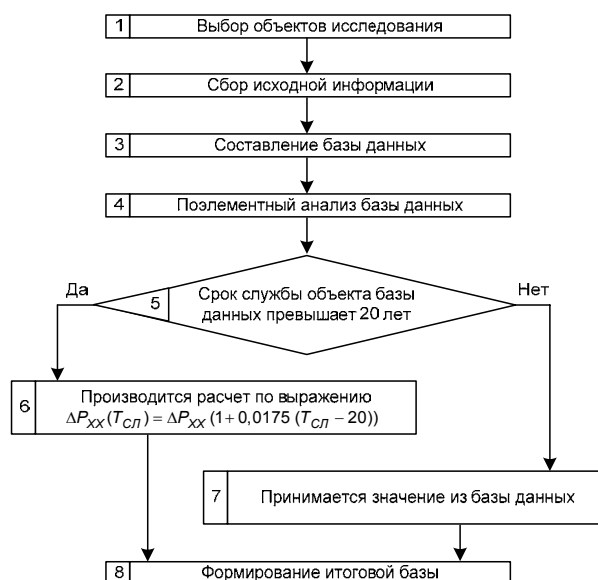


Рис. 2. Алгоритм применения разработанного метода оценки энергетической эффективности работы СТ

Разработанный метод расчета МПХХ СТ и предложенный алгоритм его реализации позволяют существенно упростить процесс оценки показателей энергетической эффективности СТ при планировании мероприятий по замене трансформаторов в условиях низкого уровня мониторинга их состояния и характеристик.

Список литературы

1. 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.
2. 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. Мошкарина*. – Иваново, 2007. – С. 351–356.
3. Балабин А.А., Волчков Ю.Д. Анализ составляющих потерь электроэнергии в силовых трансформаторах ОАО «Орелэнерго» // *Энерго- и ресурсосбережение XXI век: мат-лы IV Междунар. науч.-практ. интернет-конф.* – Орел: ОрелГТУ, 2006. – С. 112–115.
4. Казаков Ю.Б., Фролов В.Я., Коротков А.В. Методика определения мощности потерь холостого хода трансформаторов с различным сроком службы // *Вестник ИГЭУ*. – 2012. – Вып. 1. – С. 20–24.

References

1. Kazakov, Yu.B., Kozlov, A.B., Korotkov, V.V. Uchet izmeneniya poter' kholostogo khoda transformatorov v period sroka sluzhby pri raschete poter' v raspredelitel'nykh setyakh [Taking into account the changes in no-load losses of transformers during their lifetime while calculating the losses in distribution networks]. *Elektrotehnika*, 2006, issue 5, pp. 11–16.
2. Korotkov, V.V., Kozlov, A.B., Korotkov, A.V. Kolichstvennaya otsenka zavisimosti poter' kholostogo khoda silovykh transformatorov ot sroka ekspluatatsii [Quantitative assessment of the dependence of no-load losses of power transformers on their lifetime]. *Trudy IGEU «Povyshenie effektivnosti raboty energosistem»* [ISPEU collected works]. Ivanovo, 2007, issue 8, pp. 351–356.
3. Balabin, A.A., Volchkov, Yu.D. Analiz sostavlyayushchikh poter' elektroenergii v silovykh transformatorakh ОАО «Orelenergo» [Analysis of loss components in power

transformers of the ОАО «Orelenergo»]. *Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii «Energii resursosberezhenie XXI vek»* [Proceedings of the IV-th international scientific and practical internet-conference «Power and resource supply. XXI-st century»]. Orel, OrelGTU, 2006, pp. 112–115.

4. Kazakov, Yu.B., Frolov, V.Ya., Korotkov, A.V. *Metodika opredeleniya moshchnosti poter' kholostogo khoda transformatorov s razlichnym srokom sluzhby* [Methods of determining no-load loss power of transformers of different lifetimes]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 1, pp. 20–24.

Казakov 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,
ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и электроэнергетики,
e-mail: frolov.eed@gmail.com

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