

УДК 621.317

Методика определения систематической погрешности индукционных электросчетчиков

А.А. Шульпин¹, В.Я. Фролов², А.В. Коротков²

¹ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

²ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: aash111@ya.ru, frolov.eed@gmail.com, kav009@ya.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время существует проблема, связанная с тем, что индукционные электросчетчики в процессе эксплуатации накапливают отрицательную систематическую погрешность, что приводит к недоучету электроэнергии. Для оценки и прогнозирования эффективности мероприятий по энергосбережению необходима методика определения недоучтенной электроэнергии индукционными электросчетчиками.

Материалы и методы: При разработке методики использованы результаты измерений систематической погрешности репрезентативной выборки индукционных электросчетчиков, обработанные с привлечением методов теории вероятностей и математической статистики, корреляционного, регрессионного и дисперсионного анализа. **Результаты:** Разработана математическая модель, позволяющая определять энергетическую эффективность мероприятий по замене индукционных электросчетчиков. Предложены методика и алгоритм ее реализации при оценке недоучтенной индукционными электросчетчиками электроэнергии в зависимости от сроков их эксплуатации и нагрузок.

Выводы: Предложенная методика и алгоритм ее реализации могут быть использованы для оценки и прогнозирования показателей энергетической эффективности систем учета электроэнергии, а также при разработке мероприятий по совершенствованию систем учета электроэнергии в условиях низкого уровня мониторинга их состояния и характеристик.

Ключевые слова: индукционные электросчетчики, систематическая погрешность, системы учета электроэнергии, энергетическая эффективность.

Technique of determining systematic error of induction electric meters

A.A. Shul'pin¹, V.Y. Frolov², A.V. Korotkov²

¹ Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

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

E-mail: aash111@ya.ru, frolov.eed@gmail.com, kav009@ya.ru

Abstract

Background: Induction electric meters accumulate a negative systematic error while in operation, which leads to electric power underestimation. It is necessary to find a technique of determination of induction meters electric power underestimation for assessing and predicting energy saving efficiency.

Materials and methods: The technique was developed based on the results of measuring systematic error of representative sample of induction meters. The results were processed by the methods of probability theory and mathematical statistics as well as correlation, regression and dispersion analysis.

Results: We have developed a mathematical model that allowed us to determine the energy efficiency of induction meter replacement measures. We proposed an algorithm and a technique of realizing the model for assessing the electric energy underestimated by induction meters with their operation time and loads taken into account.

Conclusions: It was shown that the proposed method and algorithm of its realization can be used to assess and forecast the energy efficiency of electric power metering systems and to develop different activities aiming to improve the electric power metering systems if their conditions and characteristics are not monitored properly.

Key words: induction meters, systematic error, electric power metering systems, energy efficiency.

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

Основными показателями энергетической эффективности работы электротехнического комплекса городских распределительных сетей

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.

Одной из значительных составляющих технологических потерь электрической энергии нередко являются коммерческие потери элек-

троэнергии, обусловленные реальной погрешностью системы учета. Известно, что индукционные счетчики накапливают отрицательную систематическую погрешность в процессе эксплуатации [1–3], однако до сих пор нет способа для определения величины этой погрешности.

Несмотря на жесткие требования к модернизации систем учета, практика эксплуатации электрических сетей показывает, что процесс замены устаревших индукционных электросчетчиков может затянуться на многие годы, поскольку на момент выхода нормативных документов в городских электрических сетях до 70–90 % потребления электроэнергии учитывалось именно такими электросчетчиками¹.

Таким образом, определение зависимости систематической погрешности индукционных электросчетчиков (СПИЭ) от срока эксплуатации после последней поверки $T_{Сл}$ при различных средних нагрузках $S_{Сч}^*$ в процессе эксплуатации является актуальной научной и практической задачей.

Для решения этой задачи проведены экспериментальные исследования по установлению СПИЭ более 1400 электросчетчиков, регистрирующих потребление бытовой нагрузки в электрических сетях Ивановской области. По результатам экспериментальных исследований [4] разработаны регрессионные математические модели, описывающие зависимость СПИЭ $\Delta W_{нд}^*$ от срока эксплуатации $T_{Сл}$ после последней поверки электросчетчика и от нагрузки $S_{Сч}^*$. Эти модели послужили основой для разработки методики расчета СПИЭ с использованием корреляционного, регрессионного и дисперсионного анализа.

Было установлено, что влияние на величину СПИЭ $\Delta W_{нд}^*$ многочисленных факторов, за исключением срока службы $T_{Сл}$ и нагрузки $S_{Сч}^*$, незначительно.

Анализ проведен по полной выборке данных о результатах испытаний 1400 счетчиков при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и подтвержденной гипотезе о нормальном законе распределения в соответствии с критерием χ^2 Пирсона.

Для подтверждения наличия связи между СПИЭ $\Delta W_{нд}^*$, сроком эксплуатации $T_{Сл}$ и нагрузкой $S_{Сч}^*$ проведен корреляционный анализ данных. Значения коэффициентов корреляции ($r = 0,453–0,610$) свидетельствуют о наличии умеренной связи между параметрами. Коэффициенты корреляции, в соответствии с

t -критерием Стьюдента, являются статистически значимыми при $\alpha = 0,05$.

Для разработки математических моделей, описывающих изменение СПИЭ $\Delta W_{нд}^*$ в зависимости от $T_{Сл}$ и $S_{Сч}^*$ (при нагрузке счетчика $S_{Сч}^* = 100\%$ и $S_{Сч}^* = 20\%$), проведен регрессионный анализ. В качестве типов искомым уравнений линий регрессии рассмотрены линейная, степенная, экспоненциальная, гиперболическая, показательная, полиномиальная (квадратичная) и логарифмическая функции.

Определение коэффициентов уравнений для всех типов искомым 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 проведена по значению коэффициента детерминации. Адекватность регрессионных моделей экспериментальным данным проверена с помощью F -критерия Фишера.

Сравнительный анализ полученных математических моделей позволил сделать вывод о том, что в качестве адекватных статистически значимых математических моделей, наиболее точно описывающих связь СПИЭ $\Delta W_{нд}^*$ с $T_{Сл}$ при нагрузках $S_{Сч}^* = 100\%$ и $S_{Сч}^* = 20\%$, должны быть выбраны аппроксимирующие модели в виде линейных уравнений:

- для нагрузки электросчетчика 100 % от номинальной

$$\Delta W_{нд}^*, \% = -0,398 \cdot T_{Сл} - 1,563; \quad (1)$$

- для нагрузки 20 % от номинальной

$$\Delta W_{нд}^*, \% = -0,426 \cdot T_{Сл} - 0,913. \quad (2)$$

Именно для математических моделей, описываемых линейными уравнениями (1) и (2), все коэффициенты линейных уравнений являются статистически значимыми; из общего числа выбранных и статистически значимых моделей коэффициенты детерминации R^2 достигают наибольших значений, а сами функции (1) и (2) являются адекватными по отношению к экспериментальным данным.

Проведен корреляционный анализ наличия связи между СПИЭ $\Delta W_{нд}^*$ и нагрузкой $S_{Сч}^*$. В результате статистического анализа регрессионных математических моделей, описывающих изменение СПИЭ $\Delta W_{нд}^*$ в зависимости от $S_{Сч}^*$, сделан вывод о возможности линеаризации зависимостей $\Delta W_{нд}^* = f(S_{Сч}^*)$ без потери точности описания, что подтверждается различием значений коэффициентов детерминации в пределах 5 %.

Полученные выражения (1) и (2) незначительно, но все же противоречат логике измене-

¹ Циркуляр № 01-99(Э). О повышении точности коммерческого и технического учета электроэнергии. Департамент стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России». 23 февраля 1999 г.

ния величины $\Delta W_{\text{нд}}^*$ в течение периода эксплуатации, а именно, для этих зависимостей $\Delta W_{\text{нд}}^*(T_{\text{сл}} = 0) \neq 0$.

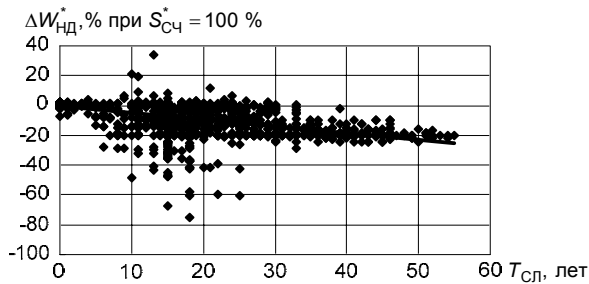
Выполнена корректировка наиболее адекватных зависимостей (1) и (2) при соблюдении условия $\Delta W_{\text{нд}}^*(T_{\text{сл}} = 0) = 0$. В результате корректировки получены зависимости (см. рисунок):

а) для нагрузки 100 % от номинальной

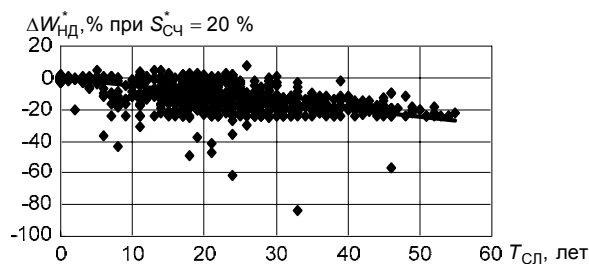
$$\Delta W_{\text{нд}}^*, \% = -0,457 \cdot T_{\text{сл}}; \quad (3)$$

б) для нагрузки 20 % от номинальной

$$\Delta W_{\text{нд}}^*, \% = -0,495 \cdot T_{\text{сл}}. \quad (4)$$



а)



б)

Зависимости СПИЭ от срока службы счетчика при нагрузках 100 % (а) и 20 % (б), полученные при условии $\Delta W_{\text{нд}}^*(T_{\text{сл}} = 0) = 0$

Полученные зависимости не противоречат логике изменения величины $\Delta W_{\text{нд}}^*$ в течение периода эксплуатации и могут быть использованы при построении расчетной модели для определения значения систематической погрешности $\Delta W_{\text{нд}}^* = (S_{\text{сч}}^*, T_{\text{сл}}), \%$, электросчетчика с произвольной нагрузкой $S_{\text{сч}}^*$ и сроком эксплуатации $T_{\text{сл}}$ практически без потери точности определения. Это подтверждается результатами сравнения коэффициентов детерминации R^2 уравнений до и после корректировки (R^2 изменяется в пределах от 0,199 до 0,205 для $S_{\text{сч}}^* = 100\%$ и от 0,358 до 0,372 для $S_{\text{сч}}^* = 20\%$).

С использованием полученных данных проведена разработка методики расчета величины $\Delta W_{\text{нд}}^* = f(S_{\text{сч}}^*, T_{\text{сл}})$ как для одного счетчика, так и для группы электросчетчиков.

При разработке методики определения систематической погрешности электросчетчика или группы электросчетчиков основными являлись следующие исходные положения:

1. Изменение систематической погрешности индукционных электросчетчиков в процессе эксплуатации описывается зависимостями (3) и (4).

2. Изменение систематической погрешности счетчика в реальном диапазоне изменения нагрузки $S_{\text{сч}}^* = (0 - 1,00) \cdot S_{\text{НОМ}}$ описывается линейной зависимостью.

В соответствии с этими положениями, уравнения (3) и (4) представлены в общем виде:

$$\Delta W_{\text{нд}}^*, \% = a_1 \cdot T_{\text{сл}}, \quad (5)$$

где коэффициент a_1 линейно зависит от нагрузки электросчетчика $S_{\text{сч}}^*$:

$$a_1(S^*) = b_1 \cdot S^* + b_0. \quad (6)$$

В соответствии с приведенными выше уравнениями для выражения функции $\Delta W_{\text{нд}}^*, \% = f(T_{\text{сл}})$:

$$\begin{cases} a_1(S_{\text{сч}}^* = 20\%) = -0,495, \\ a_1(S_{\text{сч}}^* = 100\%) = -0,457, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} 20 \cdot b_1 + b_0 = -0,495, \\ 100 \cdot b_1 + b_0 = -0,457. \end{cases}$$

В результате решения системы линейных уравнений относительно переменных b_1 и b_0 получено:

$$\begin{cases} b_1 = 0,00048, \\ b_0 = -0,505. \end{cases}$$

Таким образом, с учетом полученного решения уравнение (6) будет иметь следующий вид:

$$a_1(S_{\text{сч}}^*) = 0,00048 \cdot S_{\text{сч}}^* - 0,505. \quad (7)$$

С учетом выражения (7) уравнение (5), описывающее искомую расчетную модель определения СПИЭ при различных нагрузках и сроках эксплуатации счетчиков $\Delta W_{\text{нд}}^* = f(S_{\text{сч}}^*, T_{\text{сл}})$, выглядит следующим образом:

$$\Delta W_{\text{нд}}^*, \% = (0,00048 \cdot S^* - 0,505) \cdot T_{\text{сл}}. \quad (8)$$

Полученное выражение позволяет проводить расчет систематической погрешности индукционного счетчика, а при обработке базы данных по счетчикам электрической сети – расчет систематической погрешности системы учета с индукционными электросчетчиками.

Для разработанной методики предложен алгоритм расчета изменения погрешности индукционных счетчиков, проводящих учет отпуска электроэнергии населению в электротехнических комплексах городских распределительных сетей. Основные положения предложенного алгоритма сводятся к следующему:

1. Составляется база данных по электросчетчикам группы на момент проведения расчетов, включающая в себя сведения о сроке последней поверки счетчика и о количестве учтенной счетчиком энергии за этот период.

2. По исходным данным для каждого электросчетчика проводится расчет срока эксплуатации $T_{\text{сл}}$ с момента его последней поверки.

3. Проводится расчет средней нагрузки электросчетчика за период эксплуатации $S_{сч}^*$.

4. По формуле (8) рассчитывается систематическая погрешность $\Delta W_{нд}^*$, %, электросчетчика, накопленная за период эксплуатации.

При сложности получения информации по отдельным электросчетчикам группы расчет может проводиться по выражению (8) по средним показателям рассматриваемой группы электросчетчиков.

Среднее значение $T_{сл}$ электросчетчиков группы отражает качество эксплуатации системы учета потребителей электроэнергии, а среднее значение $\Delta W_{нд}^*$, %, определяет величину недоучета электроэнергии рассматриваемой группой электросчетчиков.

Заключение

По предлагаемой методике успешно проводились расчеты необходимого числа индукционных счетчиков, подлежащих замене в течение года по условию компенсации систематической погрешности и заданному уровню снижения коммерческих потерь электроэнергии. Например, в Ивановской городской электросети в соответствии с разработанными планами модернизации системы учета за первые два года проведена замена более 50000 счетчиков. В последующие годы объем замены электросчетчиков был на порядок меньше и планировался по условию сокращения коммерческих потерь в объеме примерно 0,5–1,0 % в год от общего объема поступления энергии в сеть.

С использованием предложенной методики проводилось обоснование мероприятий по замене индукционных электросчетчиков в системе учета электроэнергии ряда сетевых предприятий Ивановской и Вологодской областей. На основании этих обоснований составлены и реализуются планы модернизации систем учета электроэнергии.

Полученные результаты могут быть использованы для определения систематической погрешности индукционного счетчика, а в результате обработки базы данных по счетчикам – для

определения систематической погрешности системы учета с индукционными электросчетчиками.

Список литературы

1. Загорский Я.Т., Жданова Ю.Е., Комкова Е.В. Метрологические аспекты при повышении точности измерений и нормировании допустимого небаланса электроэнергии // Международный электротехнический семинар «Нормирование, анализ и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях – 2002». – М.: НЦ ЭНАС, 2002.
2. Влияние систематической составляющей относительной погрешности однофазных индукционных счетчиков бытового сектора на определение величины товарной продукции энергопредприятия / А.В. Казанцев, В.И. Теличкин, А.С. Садовская, И.А. Казанцева // Международный электротехнический семинар «Нормирование, анализ и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях – 2002». – М.: НЦ ЭНАС, 2002.
3. Гуртовцев А., Бордаев В., Чижонков В. Измерительные трансформаторы тока на 0,4 кВ: испытания, выбор, применение // Новости электротехники. – 2004. – №1(25).
4. Коротков А.В., Коротков В.В. О недоучете электроэнергии индукционными электросчетчиками // Актуальные проблемы электроэнергетики: тр. НГТУ. Т. 59. – Нижний Новгород, 2006. – С. 226–229.

References

1. Zagorskiy, Ya.T., Zhdanova, Yu.E., Komkova, E.V. Metrologicheskie aspekty pri povyshenii tochnosti izmereniy i normirovaniy dopustimogo nebalansa elektroenergii [Metrological aspects with increasing accuracy of measurements and rationing of admissible nonbalance of electric power]. *Mezhdunarodnyy elektrotekhnicheskyy seminar «Normirovanie, analiz i snizhenie poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh – 2002»* [International electrical engineering seminar «Rationing, analysis and reduction of power losses in electric power lines»]. Moscow, NTs ENAS, 2002.
2. Kazantsev, A.V., Telichkin, V.I., Sadovskaya, A.S., Kazantseva, I.A. Vliyanie sistematocheskoy sostavlyayushchey otositel'noy pogreshnosti odnofaznykh induktsionnykh schetchikov bytovogo sektora na opredelenie velichiny tovarnoy produktssii energopredpriyatiya [Influence of the relative error systematic component of single-phase induction meters of residential consumers on the determination of salable product value of a power enterprise]. *Mezhdunarodnyy elektrotekhnicheskyy seminar «Normirovanie, analiz i snizhenie poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh – 2002»* [International electrical engineering seminar «Rationing, analysis and reduction of power losses in electric power lines»]. Moscow, NTs ENAS, 2002.
3. Gurtovtsev, A., Bordaev, V., Chizhonok, V. Izmeritel'nye transformatory toka na 0,4 kV: ispytaniya, vybor, primeneniye [0,4 kV instrument transformers: tests, choice, application]. *Novosti elektrotekhniki*, 2004, issue 1.
4. Korotkov, A.V., Korotkov, V.V. O nedouchete elektroenergii induktsionnymi elektroschetchikami [On inductive meters' electricity underestimation]. *Aktual'nye problemy elektroenergetiki*, 2006, issue 59, pp. 226–229.

Шульпин Андрей Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем,
e-mail: aash111@ya.ru

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

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

Шульпин Андрей Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем,
e-mail: aash111@ya.ru

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

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