

УДК 621.317.621.391

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ УЧЕТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С КОРРЕКЦИЕЙ ПОГРЕШНОСТИ

Д. Н. Франтасов, к.т.н., доцент кафедры «ИВТ» СамГУПС; frantasov@mail.ru

Ю. В. Кудряшова, аспирант СамГУПС; julialbion@gmail.com

Небаланс в системе электроснабжения определяется как разность между потребленной и отпущенной электроэнергией. Разница списывается на потери, включающие техническую и коммерческую составляющую. Коммерческие потери вызваны, в том числе погрешностями измерительных комплексов. Более точные расчеты коммерческой составляющей позволяют объективно определять структуру потерь и мероприятия по их уменьшению. Актуальность работы в том, что коммерческие потери нельзя померить, их можно с определенной погрешностью вычислить. Цель работы – исследовать имитационную модель измерительного трансформатора тока с коррекцией погрешности от дестабилизирующих факторов, с использованием аналитических методов определения устойчивости и быстродействия элемента и системы в целом. Данные исследования позволяют сделать вывод о быстродействии и устойчивости элемента информационно-измерительной системы, а следовательно, и системы, построенной на его основе. Предложена структурная схема информационно-измерительной системы с коррекцией погрешности.

Ключевые слова: электроэнергия, моделирование, технические потери, коммерческие потери, небаланс, устойчивость, коррекция погрешности.

Введение

Решение проблемы потерь электроэнергии является сложной задачей, требующей привлечения специалистов из различных областей, в том числе из области информационных технологий. Снижение потерь невозможно достичь без капитальных вложений в изменение элементной базы энергосистемы.

Потери электроэнергии состоят из технических, вызванных физическими процессами, протекаемых в энергосистеме, и коммерческих, вызванных несовершенством средств и систем учёта электроэнергии, хищениями, недостаточным уровнем автоматизации как при учёте, так и при выставлении счетов конечным потребителям [1]. Мероприятия по расчёту потерь позволят оперативно выявлять коммерческую составляющую и тем самым уменьшать издержки энергопотребителей. Одним из решений может стать информационно-измерительная система (ИИС), способная в режиме online предоставлять информацию об энергопотреблении, вычленять коммерческую составляющую и информировать диспетчерский персонал о нештатных ситуациях. К сожалению, разработка такой системы на современной элементной базе представляется нецелесообразной из-за значительных систематических и прочих

погрешностей используемых измерительных устройств, а также значительном влиянии на точность измерений внешних воздействий.

Теоретическая часть

Измерительные трансформаторы тока являются распространённым элементом систем учёта электроэнергии. Эти устройства имеют нормированную погрешность при заданных условиях, отражённую в классе точности. Данные погрешности влияют на результирующую погрешность системы учёта.

Основным направлением уменьшения коммерческой составляющей потерь электроэнергии является создание более совершенных ИИС на основе измерительных устройств высокого класса точности. Это приводит к ощутимому и заметному сразу эффекту. Например, замена однофазных счетчиков класса 2,5 на счётчики класса точности 2,0 увеличивают объём средств, полученных от потребителей электроэнергии, на 10-20% за счет увеличения порога чувствительности и увеличения достоверности расчетов [2].

Коммерческие потери можно получить, определив разность между отпущенной и потреблённой электроэнергией без учёта технических потерь в энергосистеме [3], которая в абсолют-

ных единицах вычисляется по формуле:

$$\Delta W_K = W_{OC} - W_{ПО} - \Delta W_T, \quad (1)$$

где W_{OC} – электроэнергия, отпущенная или принятая из смежных сетей. Рассчитывается на основе счётчиков электроэнергии, установленных на границах балансовой принадлежности.

$W_{ПО}$ – электроэнергия, принятая потребителями. Рассчитывается на основе показаний потребительских счётчиков электроэнергии.

ΔW_T – технические потери электроэнергии, рассчитываемые в соответствии с нормативными документами [4, 5].

В идеале показатель небаланса в энергосистеме должен быть близок к нулю, что свидетельствует об отсутствии коммерческой составляющей потерь. Однако при эксплуатации в реальных условиях всегда присутствуют погрешности как при определении отпущенной и потреблённой энергии, так и при расчёте технической составляющей потерь, являющиеся составляющими коммерческих потерь. Сведение их к возможному минимуму позволят получать более достоверные сведения.

Небаланс в энергосистеме определяется как:

$$НБ_{\delta} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^m \delta_{ni}^2 \cdot d_{ni}^2 + \sum_{i=1}^n \delta_{oi}^2 \cdot d_{oi}^2} \% , \quad (2)$$

где $\delta_{ni}(\delta_{oi})$ – сумма погрешностей всех измерительных систем, построенных на базе измерительных трансформаторов тока и напряжения, а также счётчиков электроэнергии; $d_{ni}(d_{oi})$ – доля электроэнергии, поступившей (отпущенной) через i -й измерительный комплекс; m – количество измерительных комплексов, учитывающих электроэнергию, поступившую в сеть; n – количество измерительных комплексов, учитывающих отпущенную электроэнергию.

Относительную погрешность информационно-измерительной системы можно определить по формуле:

$$\delta_w = \pm 1.1 \times \sqrt{\delta_I^2 + \delta_U^2 + \delta_{\theta}^2 + \delta_L^2 + \delta_{co}^2 + \sum_{i=1}^l \delta_{ci}^2}, \quad (3)$$

где δ_I – класс точности измерительного трансформатора тока; δ_U – класс точности измерительного трансформатора напряжения; δ_{θ} – доверительные границы допускаемой погрешности для применяемой трансформаторной схемы подключения при измерениях активной электроэнергии; δ_L – погрешности, вызванные потерями в соединительных линиях между счётчиком и измерительным трансформатором; δ_{co} – класс точности счётчика электроэнергии; δ_{ci} – пределы

допускаемых дополнительных погрешностей счётчика электроэнергии при действии i -й влияющей величины; l – количество действующих на счётчик величин.

При повышении точности расчёта коммерческой составляющей потерь можно более точно определять составляющие, вносящие наибольшие весовые значения и условия их появления, а следовательно, качественно планировать и проводить мероприятия по их уменьшению.

В современных ИИС отсутствуют устройства или методики, позволяющие значительно повысить точность измерения электроэнергии и препятствовать влиянию дестабилизирующих факторов, внося поправки в результаты измерений, хотя такие методы и средства перспективны в смежных областях.

Известны методы коррекции погрешности измерительных трансформаторов тока, которые направлены на уменьшение, как правило, отдельных составляющих токовой или угловой погрешности в достаточно узком диапазоне внешних факторов, таких как температура окружающей среды, частота переменного тока и т.д.

Известен структурно-алгоритмический метод коррекции погрешности типового измерительного трансформатора тока, вносящий поправки в результаты измерений [6]. Метод позволяет компенсировать токовую и угловую погрешность в широком диапазоне изменения величины первичного тока, его частоты и изменения сопротивления нагрузки. Принцип работы метода: входной сигнал преобразуют в двух каналах с гальванической развязкой. В первом, основанном на типовом измерительном трансформаторе, формируют основную часть выходного сигнала, а во втором, основанном на корректирующем трансформаторе, – сигналы поправки, позволяющие компенсировать появляющиеся в результате преобразования ошибки.

На рисунке 1 приведена структурная схема измерительного трансформатора тока с корректирующим трансформатором: ИТТ – измерительный трансформатор тока, ПТК – преобразователь тока корректирующий, БКС – блок корректирующего сигнала, R_H – нагрузка, I_1 – первичный ток, I_H – ток нагрузки, I_H' – ошибка по току.

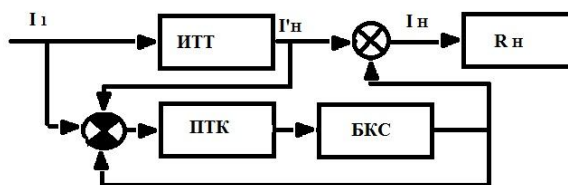


Рисунок 1 – Структурная схема ИТТ с коррекцией

Экспериментальные исследования

Приведённой структурной схеме соответствует имитационная модель, разработанная в Simulink [7].

Для моделирования электроэнергетических систем, а также устройств электротехники используется пакет расширения SimPowerSystems. В нем имеются блоки большинства электротехнических элементов и устройств: трансформаторов, ЛЭП, синхронных генераторов, асинхронных двигателей, полупроводниковых элементов, преобразователей, измерительных приборов и т.д.

Параметры модели блока трансформатора тока выбираются такими, чтобы погрешность преобразования тока не превышала погрешности реальных измерительных трансформаторов класса точности 0.5.

Общий вид имитационной модели представлен на рисунке 2.

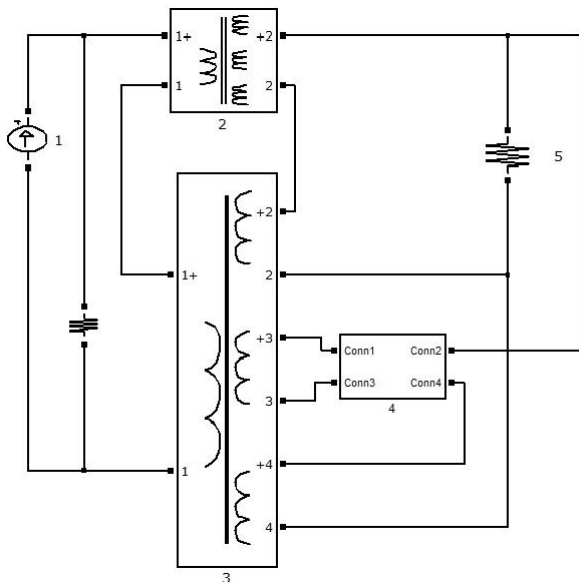


Рисунок 2 – Имитационная модель

Имитационная модель состоит из: 1 – источник тока; 2 – измерительный трансформатор; 3 – корректующий трансформатор; 4 – блок коррекции; 5 – нагрузка.

Имитационная модель построена на основе математической модели в операторной форме, которую можно представить как систему уравнений:

$$\begin{cases} I_3(p)K_{46}(p) - I_4(p)K_{46}(p) - I_6(p) - \\ - I_5(p)K_{56}(p) = 0 \\ I_6(p) = I_5(p)K_y(p) \\ I_H(p) = I_2(p) + I_6(p). \end{cases} \quad (4)$$

Если учесть расположение элементов, представленное на рисунке 2, то при:

$$I_3(p) = I_1(p); \quad (5)$$

$$I_4(p) = I_2(p); \quad (6)$$

из соотношений (4) – (6) можно получить, что ток на 6-й обмотке:

$$I_6(p) = I_1(p) \frac{K_{36}(p) - K_{46}(p)K_{12}(p)(1 + \gamma_{12})}{1 + K_{56}(p)K_y^{-1}(p)}, \quad (7)$$

где γ_{12} – погрешность измерительного трансформатора 2; $I_j(p)$ и $I_H(p)$ – изображения по Лапласу токов в j -й обмотке и в 5 соответственно, $j \in [1..6]$; $K_{mn}(p)$ – коэффициент передачи между обмотками m и n , $m \in [1..6]$ и $n \in [1..6]$; $K_y(p) = K_y / (1 + \tau p)$ – передаточная функция блока 4; τ – постоянная времени блока 4; K_y – коэффициент усиления в блоке 4 при $p=0$.

В итоге при установившемся режиме, учитывая (4) и (7), при соблюдении следующих условий:

$$K_{56}(p)K_y^{-1}(p) \ll 1; \quad (8)$$

$$K_{12}(p) = K_{36}(p); \quad (9)$$

$$K_{46}(p) = 1. \quad (10)$$

Получим:

$$I_H(p) = I_1(p)K_{12}(p). \quad (11)$$

Из (8) можно сделать вывод, что погрешность γ_{12} трансформатора 2 может быть компенсирована при соблюдении ряда условий.

Приведённая математическая модель существенно доработана и уточнена при имитационном моделировании в simulink. В ней учитываются параметры обмоток, а также нелинейная характеристика намагничивания сердечника.

Для дальнейшего исследования имитационная модель представлена в виде передаточной функции:

$$W(p) = \frac{A}{B};$$

$$A = 4,521 \cdot 10^{-5} \cdot p^3 + 50,052 \cdot p^2 + 0,5243 \cdot p$$

$$B = 8,03 \cdot 10^{-11} \cdot p^4 + 9,28 \cdot 10^{-4} \cdot p^3 +$$

$$+ 1,01 \cdot 10^3 \cdot p^2 + 2,95 \cdot 10^2 \cdot p + 2,88.$$

Исследования, проведённые ранее, показали существенное повышение точности трансформатора тока в широком диапазоне токов и частот [8], однако остаётся неясным, не повлияет ли использование дополнительного корректирующего устройства на устойчивость и быстродействие системы.

Simulink оснащён инструментом LTI-Viewer, являющимся частью инструмента Control System

Toolbox, позволяя анализировать линейные системы, сокращая время моделирования и анализа результатов. С его помощью можно аналитически определить устойчивость и быстродействие системы.

На рисунке 3 представлена реакция на единичное ступенчатое воздействие.

Из представленного рисунка видно, что объект управления устойчивый, переходный процесс монотонный. Установившаяся амплитуда 0,0509 за время $2,79 \cdot 10^{-7}$ с. Переходный процесс не имеет перерегулирования, поэтому процесс аperiodический.

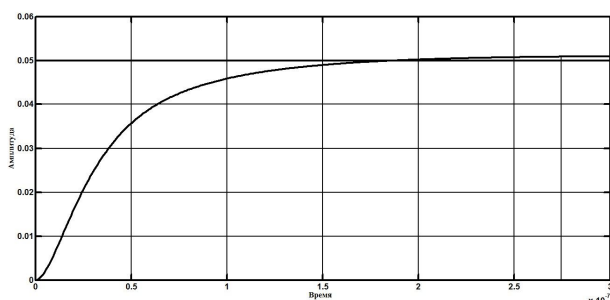


Рисунок 3 – Реакция системы на единичный скачок

На рисунке 4 представлено импульсное воздействие. Время реакции составляет 10^{-6} с. При резком изменении уровня входного сигнала от 1В до 0В выходной сигнал уменьшается до 0В за время, приблизительно равное $2,5 \cdot 10^{-7}$ с.

Наличие определенного запаса устойчивости гарантирует сохранение устойчивости системы при изменении ее параметров в определенных пределах. Чем больше запас устойчивости, тем меньше вероятность, что система станет не устойчива во время эксплуатации. Запас устойчивости необходим для определения характера переходных процессов в системах. Различают следующие показатели запаса устойчивости: запас устойчивости по амплитуде и фазе.

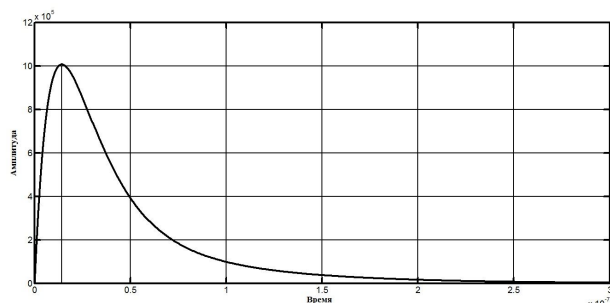


Рисунок 4 – Реакция системы на импульсное воздействие

На рисунке 5 представлена диаграмма Боде. Из графика видно, что запас устойчивости по фазе 75° , запас по амплитуде 30 дБ.

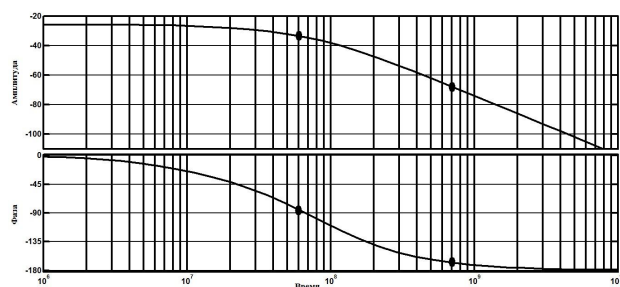


Рисунок 5 – Диаграмма Боде

Критерий Найквиста позволяет наглядно проследить влияние изменения параметров передаточной функции на устойчивость системы. На рисунке 6 представлена диаграмма Найквиста.

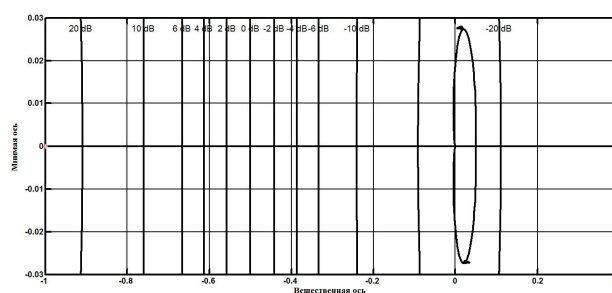


Рисунок 6 – Диаграмма Найквиста

Из рисунка видно, что система устойчива, т.к. годограф передаточной функции не охватывает на комплексной плоскости точку с координатами $(-1, j0)$.

На рисунке 7 представлена карта нулей и полюсов. По расположению корней можно сделать вывод, что система устойчива.

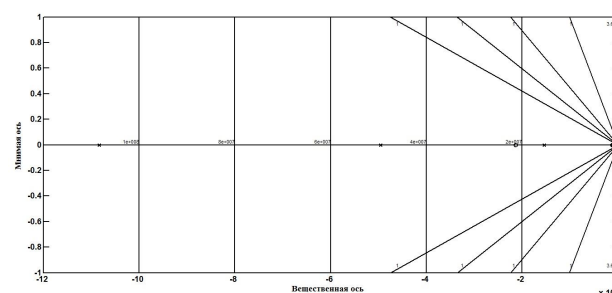


Рисунок 7 – Карта нулей и полюсов

Приведённые исследования аналитических методов имитационной модели, учитывающие паразитные параметры трансформаторов, а также нелинейность характеристик намагничивания сердечника непосредственно при моделировании, выявили устойчивость системы с коррекцией погрешности и приемлемое время реакции информационно-измерительной системы. Это позволит разрабатывать информационно-измерительные системы учёта потерь электроэнергии с коррекцией не только более высокого класса точности [9], но и устойчивых к воздействию дестабилизирующих факторов за счет устойчивости элементов, входящих в ее состав.

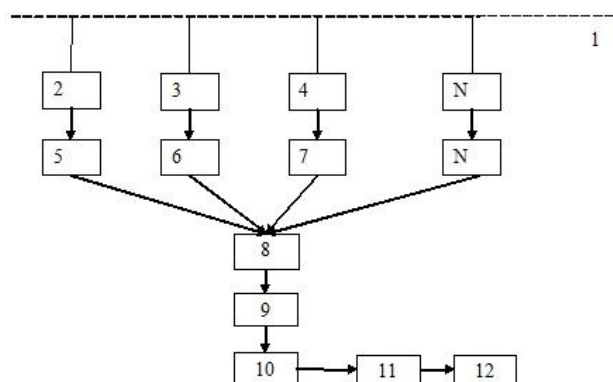


Рисунок 8 – Блок схема информационно-измерительной системы

На рисунке 8 приведена блок схема информационно-измерительной системы коммерческих потерь электроэнергии с коррекцией погрешности.

Информационно-измерительная система состоит: 1 – энергосистема; 2..N – трансформаторы тока с блоком корректировки; 5..N – счетчики с времязадающим блоком; 8 – блок приема и передачи данных; 9 – блок хранения данных; 10 – блок расчета; 11 – персональный компьютер; 12 – принтер.

Система работает следующим образом. Благодаря блокам коррекции на трансформаторах тока 2..N точность измеряемого сигнала возрастает на порядок. Рассматривается сеть напряжением до 400В, поэтому трансформатор напряжения не требуется, тем самым дополнительные погрешности не вносятся. Счетчики с времязадающим блоком 5.. N формируют отчет о потреблении электроэнергии и передают через блок приема и передачи данных 8 полученный отчет на блок хранения данных 9. Блок расчета 10 выполняет роль сервера для информационно-измерительной системы коммерческих потерь электроэнергии в системе тягового электрооборудования с коррекцией погрешности. Информационно-измерительная система на основе более точных данных рассчитывает небаланс электроэнергии на участке трансформаторов тока 2..N. Персональный компьютер 11 служит для получения сводной информации о небалансе и выводе информации на принтер 12. Все расчеты производятся на блоке 10, тем самым можно сэкономить на функциональности других блоков.

Заключение

Предлагаемая информационно-измерительная система коммерческих потерь электроэнергии с коррекцией погрешности позволяет учесть погрешности типового трансформатора и увеличить точность измерений. Техническим резуль-

татом является расширение функциональных возможностей и повышение точности за счет учета потерь электроэнергии.

Технический результат достигается тем, что в информационно-измерительную систему коммерческих потерь электроэнергии с коррекцией дополнительно введены блок приема и передачи данных, блок хранения данных, блок расчета данных и блоки время задающие, которые соединены с электрическими счетчиками, трансформаторами тока с блоками коррекции, которые соединены с электрическими счетчиками через последовательно соединенные блок приема и передачи данных с блоком хранения данных, блоком расчета данных, персональным компьютером и принтером. Трансформатор тока с блоком коррекции погрешности с поправкой по значению существенно повышает точность измерений. Блок расчета выполняет функции сервера, т.е. на нем производятся все необходимые расчеты, в том числе расчет коммерческих потерь электроэнергии.

Библиографический список

1. Бохмат И. С., Воротницкий В. Э., Татарinov Е. П. Снижение коммерческих потерь в электроэнергетических системах // Электрические станции. 1998. № 9.
2. Дерзский В. Г. Экспертиза структуры потерь электроэнергии в распределительных сетях Минтопэнерго // Энергетика и электрификация. 2002. № 4. С. 18-22.
3. РД 34.09.101-94. Типовая инструкция по учету электроэнергии при ее производстве, передаче и распределении. М.: СПО ОРГРЭС, 1995.
4. Типовая инструкция по учету электроэнергии при ее производстве, передаче и распределении (РД 34.09.101-94). М.: СПО ОРГРЭС, 1995.
5. И 34-70-030-87. Инструкция по расчету и анализу технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений. М.: СПО Союзтехэнерго, 1987.
6. Косолапов А. М. Метод улучшения метрологических характеристик средств измерений с гальванической развязкой // Измерительная техника. М., 1990. № 4. С. 43 – 45.
7. Черных И. В. Моделирование электро-технических устройств в MatLab, SimPower Systems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.
8. Франтасов Д. Н., Косолапов А. М. Исследование трансформатора тока с коррекцией погрешности // Датчики и системы. 2010. № 6. С. 55–58.
9. Кудряшова Ю. В., Франтасов Д. Н., Косолапов А. М. Повышение точности анализа коммерческих потерь электроэнергии // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. Самара: Самарский государственный университет путей сообщения, 2014. № 1(23). С.73-79.

UDC 621.317.621.391

INVESTIGATION OF THE STABILITY OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS OF ACCOUNTING FOR ENERGY LOSS WITH ERROR CORRECTION

D. N. Frantasov, Ph.D. (technical sciences), Associate Professor at the Department of «IVT» SamGUPS, Samara; frantasov@mail.ru

Ju. V. Kudryashova, post-graduate student SamGUPS, Samara; julialbion@gmail.com

Non-balance in system of power supply is defined as a difference between consumed and released electric power. The difference is attributed to losses including technical and commercial component. Commercial losses in essence are caused by errors of measuring complexes. More exact calculations of a commercial component allows to define objectively the structure of losses and action for their reduction. Relevance of work is in the fact that commercial losses can't be measured, they can be calculated with a certain error. The purpose of the work is to investigate an imitating model of measuring transformer of current with correction of an error from destabilizing factors using analytical methods to determine stability and speed of element and system in general. This research allows to draw the conclusion about speed and stability of an element in information and measuring system leading to the system constructed on its basis.

Key words: electricity, energy modeling, technical losses, commercial losses, unbalance, stability, error correction.

References

1. **Bohmat I. S., Vorotnickij V. Je., Tatarinov E.P.** Snizhenie kommercheskih poter' v jelektrojenergeticheskikh sistemah. *Jelektricheskie stancii*. 1998, no. 9 (in Russian).
2. **Derzskij V. G.** Jekspertiza struktury poter' jelektrojenergii v raspredelitel'nyh setjah Mintopjenergo. *Jenergetika i jelektrifikacija*. 2002, no. 4, pp. 18-22 (in Russian).
3. RD 34.09.101 94. Tipovaja instrukcija po uchetu jelektrojenergii pri ee proizvodstve, peredache i raspredelenii. Moscow: SPO ORGRJeS, 1995 (in Russian).
4. Tipovaja instrukcija po uchetu jelektrojenergii pri ee proizvodstve, peredache i raspredelenii (RD 34.09.101-94). Moscow: SPO ORGRJeS, 1995 (in Russian).
5. I 34-70-030-87. Instrukcija po raschetu i analizu tehnologicheskogo rashoda jelektricheskoi jenergii na peredachu po jelektricheskim setjam jenergosistem i jenergoobedinenij. Moscow: SPO Sojuztehjenergo, 1987 (in Russian).
6. **Kosolapov A. M.** Metod uluchshenija metrologicheskikh harakteristik sredstv izmerenij s gal'vanicheskoi razvjazkoj. *Izmeritel'naja tehnika*. Moscow. 1990, no. 4, pp. 43 – 45 (in Russian).
7. **Chernyh I. V.** Modelirovanie jelektrotehnicheskikh ustroystv v MatLab, SimPower Systems i Simulink (Simulation of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink). Moscow: DMK Press, 2007, 288 p. (in Russian).
8. **Frantasov D. N., Kosolapov A. M.** Issledovanie transformatora toka s korrekciej pogreshnosti. *Datchiki i sistemy*. 2010, no. 6, pp. 55–58 (in Russian).
9. **Kudryashova Ju. V., Frantasov D. N., Kosolapov A. M.** Povyshenie tochnosti analiza kommercheskih poter' jelektrojenergii. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija*. 2014, no. 1(23), pp.73-79 (in Russian).