
УДК 621.311

А.Б. Баламетов¹, д-р техн. наук,
Э.Д. Халилов¹, **Х.И. Набиев**², кандидаты техн. наук, **О.В. Илясов**²

¹ Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-исследовательский ин-т энергетики,

² ООО «Азерэнержи»

(Республика Азербайджан, Аз 1012 Баку, пр. Зардаби, 94,
тел. (+99412) 4301551, e-mail: balametov.azniie@gmail.com)

Определение потерь активной мощности воздушной линии сверхвысокого напряжения по текущим параметрам режима на концах линии

Предложена модель воздушной линии (ВЛ) электропередачи переменного тока для оценки суммарных потерь активной мощности ВЛ и выделения из них составляющей потерь на корону. Сформулированы требования к системам оперативной оценки потерь активной мощности по текущим параметрам режима на концах ВЛ сверхвысокого напряжения. Представлена система измерения, основанная на оценке систематической погрешности измерения суммарных потерь и ее исключении из общего результата. Приведены результаты измерения параметров режима специализированными измерительными комплексами на основе персональных компьютеров и оценки потерь на корону для ВЛ 500 кВ.

Запропоновано модель повітряної лінії (ПЛ) електропередачі змінного току для оцінки сумарних втрат активної потужності ПЛ та виділення з них складової втрат на корону. Сформульовано вимоги до систем оперативної оцінки втрат активної потужності згідно до поточних параметрів режиму на кінцях ПЛ надвисокої напруги. Подано систему вимірювання, базовану на оцінці систематичної похибки вимірювання сумарних втрат та її виключенні із загального результату. Наведено результати вимірювання параметрів режиму спеціалізованими вимірювальними комплексами на базі персональних комп'ютерів та оцінки втрат на корону для ПВ 500 кВ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: воздушные линии сверхвысокого напряжения, потери мощности, потери на корону, измерительная система, погрешность.

Параметры воздушной линии (ВЛ) электропередачи — активное сопротивление, активная и емкостная проводимости линии, потери мощности на нагрев проводов и на корону в реальных условиях — меняются в зависимости от температуры окружающей среды и метеорологических условий на трассе линии [1—6]. Сопротивление провода зависит от плотности

© А.Б. Баламетов, Э.Д. Халилов, Х.И. Набиев, О.В. Илясов, 2013

тока, температуры окружающей среды, скорости ветра и интенсивности осадков. В связи с этим оперативная идентификация параметров ВЛ с учетом реальных условий работы имеет важное значение.

Измерения потерь мощности на корону на действующих линиях электропередачи (ЛЭП) сверхвысоких напряжений (СВН) необходимы для:

- исследования потерь на корону в реальных ВЛ СВН,
- оптимального управления режимами ВЛ для обеспечения заданных напряжения и реактивной мощности,
- оперативного уточнения параметров модели ВЛ,
- техничко-экономического анализа работы ВЛ при обмене электрической энергией между электроэнергетическими системами (ЭЭС).

В связи с внедрением универсального измерительного комплекса (УИК), оперативного информационного комплекса (ОИК) и специализированных устройств измерения и регистрации параметров режима на основе персонального компьютера (ПК) в электроэнергетике в последнее время большое внимание уделяется определению суммарных потерь активной мощности в ВЛ по измерениям активных мощностей на концах линии [2—4, 7—10] и выделению из них потерь мощности на корону.

В работах [1—6] описана система оперативного измерения потерь мощности, основанная на различии активных мощностей на концах линии. В этих работах основное внимание уделено упрощенным подходам к моделированию систематических погрешностей системы измерения. Вместе с тем, возможно более точное моделирование систематической погрешности системы измерения потерь активной мощности по текущим параметрам режима на концах ВЛ СВН.

Однако в настоящее время оперативная модель коронирующей ВЛ СВН недостаточно разработана. Отсутствуют требования к системе оперативной оценки потерь мощности по разнице активных мощностей на концах линии. На современном этапе управления ЭЭС с использованием возможностей новой измерительной техники актуальным является определение экономически обоснованной и практически приемлемой точности системы измерения разницы активных мощностей на концах ВЛ СВН.

Применяемые методики определения потерь мощности на корону разработаны по результатам экспериментов, проведенных на опытных участках и на ограниченном числе эксплуатируемых ВЛ. Суммарные потери активной мощности в линии складываются из потерь на нагрев проводов $\Delta P_{н.п}$ и потерь на корону $\Delta P_{к.}$. Для ВЛ СВН длиной 300 км при нормальных условиях работы они составляют менее 7 % передаваемой мощности. Поскольку величины активной мощности на концах линии достаточно близки, погрешность определения суммарных потерь может быть большой ($\Delta P_{\Sigma} = P_1 - P_2$).

До настоящего времени не разработана удовлетворительная методика идентификации режима ВЛ СВН. Анализ режимов проводится по конструктивным параметрам ЛЭП, что приводит к ошибкам, которые появляются вследствие неточных измерений длины ЛЭП, изменяющихся реальных условий ее работы (интенсивности осадков, температуры, скорости ветра и др.).

В работе [5] на основе анализа оперативно рассчитываемых потерь на корону и емкостной проводимости ВЛ в сочетании с информацией о погодных условиях по трассе линии предложена методика мониторинга и прогнозирования гололедных образований. В связи с этим возникает актуальная задача более точной идентификации электрических параметров режимов ЛЭП.

Суммарные потери активной мощности в линии можно определять по разности активных мощностей (P_1 и P_2) на ее концах:

$$\Delta P_{\Sigma} = P_1 - P_2 + P_c + P_{сл},$$

где P_c и $P_{сл}$ — систематическая и случайная составляющие погрешности измерения. При увеличении числа измерений случайную составляющую погрешности удается уменьшить ($P_{сл} \rightarrow 0$).

В настоящее время появилась возможность проведения натурных экспериментов на действующих ВЛ СВН напряжением 220—1150 кВ по определению разницы активной мощности на концах ВЛ на качественно новой основе. Для этого используются современные автоматизированные информационно-измерительные системы и микропроцессорные измерительные приборы. Для точного учета погодных условий требуется установка метеостанций на трассе ВЛ и камер для визуализации короны.

Измерения в темпе процесса выполняются с использованием результатов векторного измерения параметров режима, которое основано на использовании регистраторов РМУ (phasor measurement unit), обладающих высокой разрешающей способностью, значительно выше, чем у традиционных систем сбора информации о параметрах электрического режима средствами телемеханики.

Для уменьшения систематических погрешностей системы измерения потерь мощности на корону и нагрев проводов необходимо учитывать следующее: длину ВЛ; температуру провода; распределение напряжения вдоль ВЛ при моделировании потерь мощности на корону; перепад напряжения ВЛ СВН; результаты векторного измерения.

Результаты моделирования потерь на корону по разным методикам существенно различаются [1, 7]. Например по методике ВНИИЭ удельные потери на корону при хорошей погоде составляют 2,4 кВт/км, а по мето-

дике ЭНИН — 4 кВт/км. При длине ВЛ СВН 300 км разница в потерях составляет $(4,0 - 2,4) 300 \cdot 10^{-3} = 0,48$ МВт. Действующая методика расчета и нормативные документы по учету потерь электроэнергии на корону в ВЛ занижают их значения.

Для выделения составляющих потерь необходимо учитывать потери в тросах и опорах ВЛ, вызванные индуктированными токами, а также потери в линейной арматуре ВЛ. Наличие в линейной арматуре замкнутых контуров из магнитных материалов приводит к потерям электроэнергии в них на перемагничивание и вихревые токи. Длина ВЛ, как правило, определяется на основе проектных данных, уточняемых при строительстве и эксплуатации.

Основные требования к системе измерения потерь активной мощности по текущим параметрам режима на концах ВЛ СВН следующие:

1. Определение потерь на корону при хорошей погоде.
2. Определение потерь на нагрев проводов с учетом их температуры.
3. Корректировка точности задания длины ВЛ.
4. Обоснование выбора длины интервала усреднения активной мощности ВЛ для выделения составляющих потерь мощности.
5. Моделирование систематических погрешностей трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН) и заданного сопротивления соединительных проводов в зависимости от фактической загрузки.
6. Моделирование характеристики погрешностей элементов системы и систематической погрешности измерения разницы активных мощностей на концах ВЛ СВН.
7. Учет погодных условий с помощью современных метеостанций по трассе ВЛ и на подстанциях.

В [11] рассмотрены требования к системе цифрового измерения параметров режимов энергосистем с учетом измерения потерь активной мощности в ЛЭП. Моделирование потерь мощности на корону с учетом распределения напряжения вдоль ВЛ выполняется с помощью следующего выражения [1, 8]:

$$\Delta P_{\text{к}} = \Delta P_{\text{к0}} \left(\frac{U_2}{U_0} \right)^{\rho} \int_0^L \left(\frac{U'_x}{U_2} \right)^{\rho} dx, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{к0}}$ — удельные потери на корону при напряжении U_0 ; ρ — показатель степени; U_x — напряжение на расстоянии x от конца линии.

Моделирование потерь на нагрев проводов с учетом распределения напряжения вдоль ВЛ. Одним из элементов системы измерения суммарных потерь повышенной точности являются алгоритмы модели-

рования потерь на нагрев проводов и на корону и выделения их из суммарных потерь. Суммарные потери активной мощности ВЛ СВН можно определить по параметрам режима в конце передачи: активной мощности P_2 , реактивной мощности Q_2 и модуля напряжения U_2 . Формулу для определения потерь мощности на нагрев проводов можно представить в виде [1]

$$\Delta P = a_{\Delta P_1} \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} + a_{\Delta P_2} U_2^2 + a_{\Delta P_3} P_2 + a_{\Delta P_4} Q_2,$$

где $a_{\Delta P_1}$, $a_{\Delta P_2}$, $a_{\Delta P_3}$, $a_{\Delta P_4}$ — коэффициенты, получаемые по комплексным коэффициентам A , B , C , D из уравнений эквивалентного четырехполюсника, построенного по данным ВЛ [8].

Для повышения точности системы измерения разницы активных мощностей на концах ВЛ СВН необходимо определить метрологические характеристики погрешностей ТТ, ТН и измерителя активного сопротивления ВЛ при натурных измерениях. Поэтому требуется отслеживание параметров режима для оперативного уточнения потерь активной мощности на корону и нагрев проводов.

На рис. 1 приведена блок-схема оперативного уточнения параметров ВЛ СВН. Предлагаемая методика оперативного уточнения параметров ВЛ СВН заключается в следующем:

- измерении параметров режима с меньшим интервалом усреднения;
- оперативной оценке систематической погрешности моделированием систематических погрешностей комплексов измерения по более полным реальным характеристикам;
- оперативном моделировании режима ВЛ СВН;
- моделировании потерь на нагрев проводов и на корону по уравнениям с распределенными параметрами;
- использовании реактивного эффекта короны как дополнительного критерия выбора для улавливания моментов изменения погоды;
- использовании систем измерений на основе специализированных устройств измерения и ПК, обеспечивающих синхронизацию измерений на концах ВЛ.

Моделирование систематической погрешности комплекса измерения активной мощности. Расчет систематической погрешности комплекса измерения активной мощности и ее коррекция позволяют повысить точность измерения. Разработаны алгоритм и программа для оперативного моделирования зависимости систематической погрешности комплекса измерения активной мощности от параметров режима измерительных цепей и условий эксплуатации.

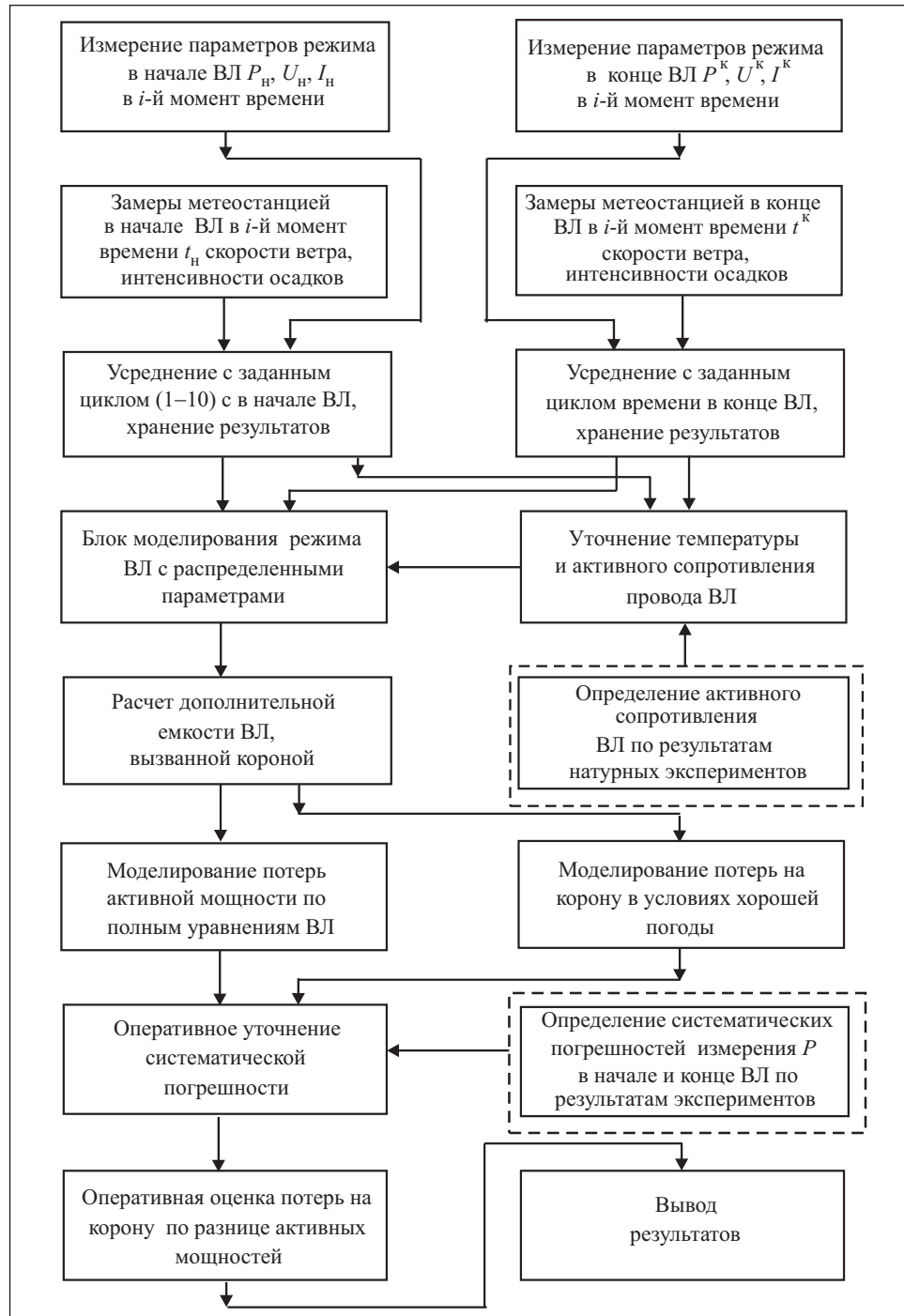


Рис. 1. Блок-схема оперативного уточнения параметров ВЛ СВН

Будем рассматривать моделирование элементов измерительного комплекса (ИК) систематических погрешностей активной мощности и электроэнергии (ЭЭ) в высоковольтных электрических сетях по фактическим характеристикам для повышения точности учета таких погрешностей. Погрешность измерения ЭЭ определяется большим числом ее составляющих [1—6, 10]. Классы точности приборов отражают диапазон неопределенности для рассматриваемого прибора. Погрешность любого элемента ИК имеет конкретное значение, которое при нормальных условиях может незначительно изменяться в пределах определенного уровня.

Фактически каждый ТТ и ТН имеет свои характеристики погрешностей, определяемые в зависимости от параметров режима измерительных цепей и условий эксплуатации. Характеристики погрешностей ТТ и ТН уточняются экспериментально с учетом реальных условий эксплуатации ИК.

Большие погрешности измерений мощности приводят к финансовым потерям производителей и поставщиков ЭЭ. Недостаточная точность измерений обусловлена недостатками существующих систем учета ЭЭ, поскольку ИК на энергообъектах создавались по типовым проектам, разработанным в 70—80-х годах XX века, в которых не предусматривалось обеспечение высокой точности ИК.

В настоящее время при измерениях ЭЭ на большинстве энергообъектов не учитывают реальные погрешности измерительных трансформаторов, поскольку они, как правило, неизвестны и при расчете погрешностей ИК погрешности измерительных трансформаторов учитываются только как случайные величины. Поэтому необходимо получение аналитических зависимостей метрологических характеристик измерительных трансформаторов от параметров режима измерительных цепей и условий эксплуатации.

Систематические погрешности ТН определяются расчетом схемы его замещения по результатам измерения активных сопротивлений обмоток и значений амплитуд первых гармоник напряжений, токов и гармонических фазовых углов в опытах с холостым ходом (х.х.) и коротким замыканием. Оценку истинного значения погрешности ТН как косвенно измеряемой величины получают в виде наиболее достоверного значения косвенно измеряемой величины, получаемого подстановкой в уравнение средних арифметических исходных величин.

Для практических задач необходимо определять фактические значения погрешностей учета ЭЭ. Поэтому возникает необходимость определения составляющих погрешностей ИК с учетом реальных условий его эксплуатации.

Для учета погрешностей в измерительных ТТ и ТН используются различные упрощенные подходы. Для более точного моделирования систематических погрешностей ИК необходимо использовать полные математические модели ТТ и ТН.

Предлагаются более точные модели элементов ИК активной мощности на основе полных проектных (паспортных) данных каждого конкретно измерительного трансформатора с учетом использованной марки стали, размеров магнитопровода, а также данных по витковой коррекции.

Погрешность ТН можно определить по формуле

$$\Delta U_{\text{ТН}} = \left\{ \frac{I_0(r'_1 \sin \psi_{\text{ТН}} + x'_1 \cos \psi_{\text{ТН}})}{U_1} + \frac{I'_2[(r'_1 + r_2) \cos \varphi_2 - (x'_1 + x_2) \sin \varphi_2]}{U_1} \right\} 100(\%), \quad (2)$$

где U_1 — напряжение первичной обмотки ТН; I_0 и I_2 — ток х.х. и ТН, приведенные к вторичной обмотке ТН; $\psi_{\text{ТН}}$ — угол потерь ТН; r'_1 — сопротивление первичной обмотки ТН, приведенное к вторичной обмотке; x'_1 — реактивное сопротивление первичной обмотки ТН, приведенное к вторичной обмотке; r_2 — сопротивление вторичной обмотки ТН; $\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности нагрузки ТН; x_2 — индуктивное сопротивление вторичной обмотки ТН.

Угловая погрешность в минутах при ненормальном напряжении составляет

$$\delta_{\text{ТН}} = \frac{3440}{U_1} \{ I_0(r'_1 \cos \psi_{\text{ТН}} - x'_1 \sin \psi_{\text{ТН}}) + I_2[(r'_1 + r_2) \sin \varphi_2 - (x'_1 + x_2) \cos \varphi_2] \}. \quad (3)$$

Цифра, обозначающая класс точности, соответствует предельному классу точности ТН.

Границы нормированных погрешностей ТН определяются при $U_1 = (0,8 \div 1,2) U_{1\text{ном}}$, $\cos \varphi_2 = 0,8$ и $S_2 = (0,25 \div 1,0) S_{\text{ном}}$, где S_2 — полная мощность в конце ВЛ; $S_{\text{ном}}$ — номинальная полная мощность. Систематическую погрешность ТН можно оценить по фактической вторичной нагрузке ТН ($S_{\text{ТНф}}$) для номинального напряжения. При отклонении напряжения на $\pm 10\%$ мощности ТН вместо $S_{\text{ТНф}}$ используется расчетное значение

$$S_{\text{ТНр}} = S_{2\text{ТНф}} \left(\frac{U_1}{U_{1\text{ном}}} \right)^2. \quad (4)$$

Значение тока намагничивания зависит от фактического напряжения U_1 . Зависимость намагничивающего тока трансформатора от напряжения имеет вид

$$I_0 = I_{0\text{ном}} \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2. \quad (5)$$

При повышении напряжения на 5 % от номинального значение тока намагничивания может возрасти более чем на 25 % по сравнению с током намагничивания при номинальном напряжении.

На точность измерения кроме ТН влияет падение напряжения от тока вторичной нагрузки. Систематическая погрешность, вносимая соединительными проводами вторичной цепи ТН, определяется так:

$$\Delta U_{\text{пр}} = \left\{ \frac{I_2(r_{\text{пр}} \cos \varphi_2 - x_{\text{пр}} \sin \varphi_2)}{U_{2\text{ТН}}} \right\} 100(\%), \quad (6)$$

где $U_{2\text{ТН}}$ — напряжение вторичной обмотки ТН; $r_{\text{пр}}$ и $x_{\text{пр}}$ — активное и реактивное сопротивления соединительных проводов.

Угловая систематическая погрешность соединительных проводов вторичной цепи ТН определяется по формуле

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{3440}{U_1} [I_2(r_{\text{пр}} \sin \varphi_2 - x_{\text{пр}} \cos \varphi_2)]. \quad (7)$$

Для повышения точности моделирования погрешности необходимо учитывать зависимость сопротивлений обмоток ТТ и ТН от температуры окружающей среды. Влияние температуры в первую очередь сказывается на изменении активных сопротивлений ТТ и ТН:

$$R = R_{20} [1 + \alpha (t_{\text{о.с}} - 20)], \quad (8)$$

где R_{20} — удельное активное сопротивление при температуре провода 20 °С; $\alpha = 0,004$ — температурный коэффициент электрического сопротивления сталеалюминевых проводов, 1/град; $t_{\text{о.с}}$ — температура окружающей среды, °С.

Выражения (2)—(8) представляют собой математическую модель погрешностей ТТ и ТН. По этим выражениям могут быть рассчитаны погрешности измерительного трансформатора с учетом влияющих факторов [10, 12].

Разработана программа для расчета систематических погрешностей ИК активной мощности и ЭЭ в высоковольтной электрической сети по полным параметрам ТТ и ТН. Программа моделирования систематических погрешностей системы измерения активной мощности высоковольтной линии состоит из модулей расчета систематических погрешностей ТН, ТТ, соединительных проводов и ИК. Результаты расчета в виде систематических погрешностей ИК получают в табличном виде и в виде полинома второй степени. Программа может быть использована как для оперативного расчета погрешностей ИК в темпе процесса измерения, так и для получения характеристик в аналитическом виде.

Пример. Расчеты систематической погрешности ИК для каскадного ТН 500 кВ выполнены на примере ВЛ 500 кВ. Использован ТН класса точности 0,5 при $U_{1н} = 500$ кВ, $U_{2н} = 100$ В, $S_{2н} = 200$ ВА, $\cos \varphi_{2ТН} = 0,8$ с витковой коррекций 0,25 % $S_{2\max} = 2000$ ВА, $I_0 = 10$ А при $t_{о.с} = 20$ °С, коэффициенте активно-индуктивной нагрузки $\cos \varphi_{2ТН} = 0,8, \cos \psi_{ТН,х.х} = 0,167$. Зависимости систематической погрешности ТН по напряжению и углу от нагрузки при $t_{о.с} = 20$ °С приведены в табл. 1, где также указаны продольная $\Delta U'$ и поперечная $\Delta U''$ составляющие падения напряжения в ТН.

Современные счетчики ЭЭ способны не только выполнить ее учет, но и позволяют реализовать ряд дополнительных функций. Моделирование систематических погрешностей системы измерения с учетом реальных условий эксплуатации и коррекции результата измерения позволяет повысить точность измерения активной энергии. Программное обеспечение позволяет также получить аппроксимационные зависимости для систематической погрешности системы измерения ЭЭ в виде

$$P_c = a_0 + a_1 P_{2ТН} + (c_1 I_{ТТ2} + c_2 (I_{ТТ2})^2) - 0,000291(d_0 + d_1 I_{ТТ2} + d_2 (I_{ТТ2})^2) - (b_0 + b_1 P_{2ТН}) Q / P,$$

где $I_{ТТ2}$ — ток во вторичной обмотке ТТ; $k_{ТТ}$ — коэффициент трансформации ТТ.

Измерительные ТТ и ТН находятся в неодинаковых условиях. Вторичная нагрузка ТН в начале ВЛ составляла по фазам 0,76, 0,46 и 0,81 А, а в конце ВЛ — соответственно 0,33, 0,28 и 0,33 А. Напряжение в начале линии в зависимости от передаваемой мощности менялось в пределах 498—508 кВ, а в конце передачи — в пределах 435—460 кВ. Длина и сечение проводов вторичных цепей также были различны.

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования выполнялись по измерениям параметров режима на концах ВЛ 500 кВ «2-я Апшеронская» на базе устройства SIMEAS Q и ПК [2]. Проанализированы вопросы экономичности эксплуатации ВЛ и поте-

Таблица 1

Номер замера	$S_{2ТН}$, ВА	$\Delta U'$, %	$\Delta U''$, %	U , %	$\varphi_{ТН}$, мин
1	0	0,1126	-0,636	0,1146	-21,86
2	50	0,1983	-0,7108	0,2008	-24,44
3	100	0,2838	-0,7855	0,2869	-27,00
4	150	0,3692	-0,8601	0,3729	-29,57
5	200	0,454	-0,934	0,459	-32,13

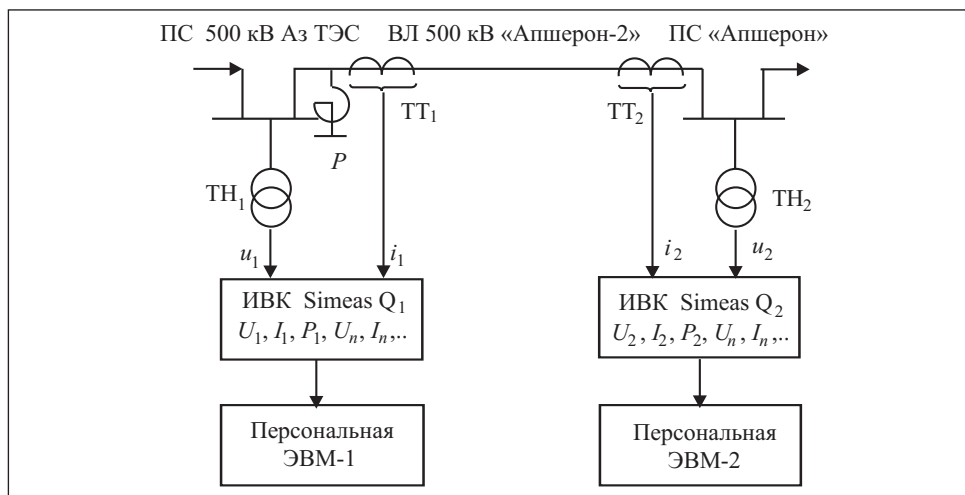


Рис. 2. Схема измерения параметров режима ВЛ 500 кВ

ри мощности в ВЛ СВН. Для измерения параметров ВЛ 500 кВ был использован измерительно-вычислительный комплекс (ИБК) SIMEAS Q (устройство фирмы Siemens). Устройство измеряет частоту, активную, реактивную и полную мощности, коэффициент мощности, напряжение, дозу фликера, от одной до сорока гармоник напряжения и тока, полное гармоническое искажение, активную энергию (импорт и экспорт), реактивную (индуктивную и емкостную) энергию и полную энергию системы. Время усреднения параметров измерения составляет от одной до 3600 с. Точность измерения по напряжению и току составляет менее 0,1%, по мощности — менее 0,2 %.

На рис 2. приведена схема комплексной системы измерения параметров режима, состоящей из систем измерения в начале линии «2-я Апшеронская» 500 кВ на подстанции (ПС) «Азербайджанская ТЭС» 500/330 кВ и в конце линии на ПС «Апшерон» 500/330/220 кВ.

Параметры ВЛ «2-я Апшеронская» имеют конструкцию фазы ЗАС-330/40, удельные сопротивления (активное — 0,029 Ом/км и реактивное — 0,299 Ом/км), емкостную проводимость $3,74 \cdot 10^{-6}$ См/км, волновое сопротивление 283 Ом/км. Натуральная мощность ВЛ 900 МВА, длина — 250,54 км (с учетом провисания проводов — 252 км). Продолжительность погодных условий на трассе ВЛ принята следующая: хорошая погода — 7960 ч.; сухой снег — 150 ч.; дождь — 600 ч.; изморозь — 500 ч. в году. Сопротивление провода ВЛ с учетом его температуры (в дни замеров — 3—10 °С) при $t = 10$ °С составляет $R_t = 0,96 R_0$.

Проведено шесть серий опытов. Измерения параметров режима осуществлялись с 17 по 21.02.2008 с использованием ИВК SIMEAS Q непосредственно на ВЛ 500 кВ при различных режимах и времени усреднения параметров режима 1 с, 10 с и 1, 5 мин, 10 мин.

Высота трассы ВЛ находится на высоте 500-700 м над уровнем моря. Давление воздуха — 750 мм рт. столба, температура от -20 до $+42$ °С, влажность — 50—70 %, осадки — 400—600 мм/г. Во время проведения измерений по зоне прохождения ВЛ 500 кВ наблюдались следующие погодные условия: хорошая погода, туман, дождь и снег. Температура воздуха менялась от -5 до $+8$ °С.

Напряжение в конце ВЛ 500 кВ в зависимости от передаваемой по линии мощности изменялось в пределах 498—508 кВ, в конце передачи — в пределах 435—460 кВ.

Определение систематической погрешности по уравнениям баланса мощности линии при хорошей погоде. Как известно, потери мощности на корону в линии имеют наименьшее значение при хорошей погоде. При известных измеренных значениях параметров режима на концах линии и полученному в результате моделирования значению потерь на корону при хорошей погоде $\Delta P_{\text{к.х.п.м}}$ систематическая погрешность системы измерения составит $P_c = \Delta P_{\text{н.п}} + \Delta P_{\text{к.х.п.м}} - P_1 + P_2$.

В основу метода определения момента наступления хорошей погоды может быть положен тот факт, что в идеальных условиях хорошей погоды величина потерь мощности на корону минимальна, зависит только от режимных параметров ВЛ и может быть получена расчетным путем по модели линии и измеренным режимным параметрам ВЛ ($\Delta P_{\text{к.изм}}$). Определять моменты наступления хорошей погоды по всей трассе ВЛ можно, отслеживая параметры режима на концах линии: $P_1 - P_2 - \Delta P_{\text{н.п}} \rightarrow \min$. Установление момента наступления хорошей погоды определяется условием $\Delta P_{\text{к.изм}} \leq \Delta P_{\text{к.х.п.м}}$.

Графики активных и реактивных мощностей и напряжений в начале и конце ВЛ 500 кВ за сутки по измерениям 20.02.2008 г. при интервале усреднения 5 мин приведены на рис 3. Передача по ВЛ 500 кВ «2-я Апшеронская» большой реактивной мощности (приблизительно 300 МВАр) является недопустимой согласно условиям оптимальной эксплуатации ВЛ СВН. Это свидетельствует о дефиците реактивной мощности в районе ЭЭС. Падение напряжения меняется в пределах 45—65 кВ и составляет примерно 9—13% номинального, что превышает предельно допустимые значения (-10 %). Во время замеров 20.02.2008 на трассе ВЛ наблюдались: густой туман, плохая видимость, дождь, мокрый снег. Потери на нагрев проводов моделировались по уравнениям линии с распределенными параметрами.

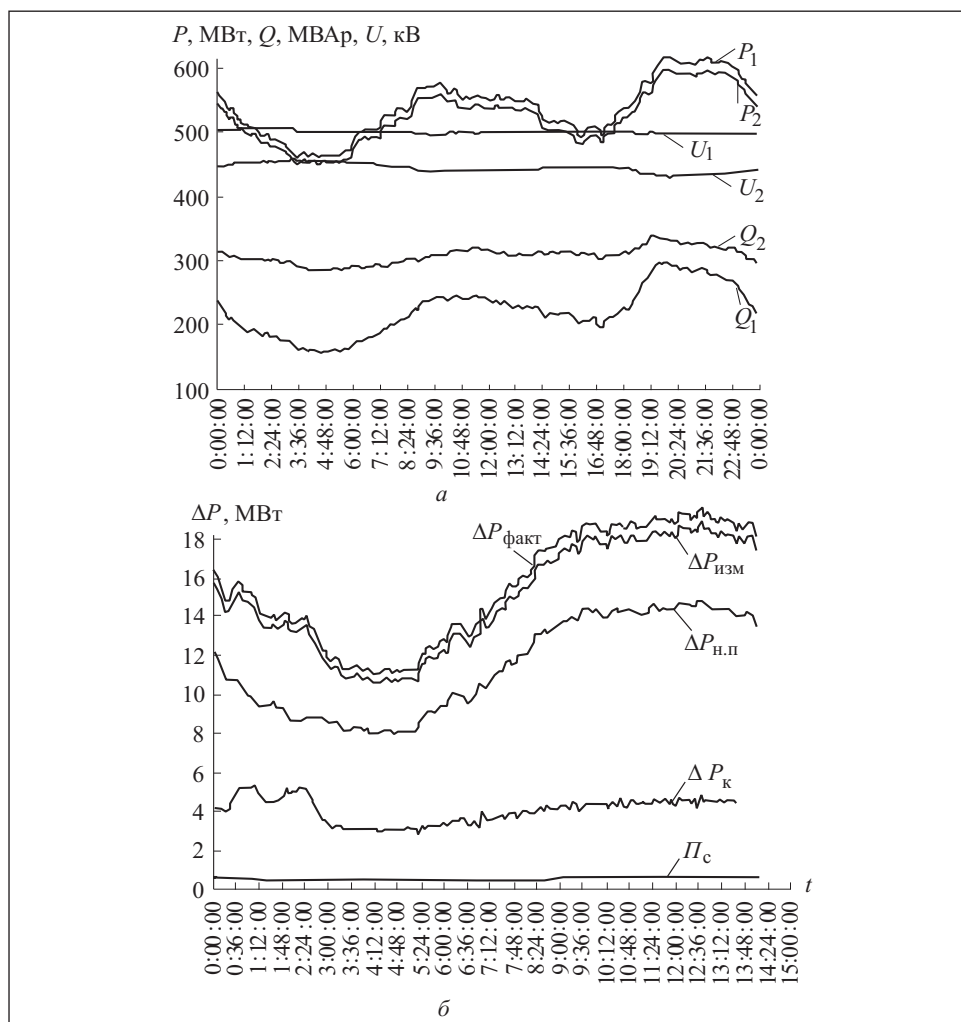


Рис. 3. Графики замеров режимных параметров (а) и изменения потерь активной мощности (б) ВЛ 500 кВ: t — время измерения (часы: минуты: секунды)

Систематическая погрешность измерения суммарных потерь активной мощности изменяется в зависимости от параметров режима. Используя методы статистического анализа, можно найти регрессионную зависимость вида $P_{\text{с}} = P_0 + f(P, Q, U)$. Поскольку получаемые значения потерь мощности на корону имеют разброс, необходимо выполнять оценку среднеквадратического отклонения погрешности измерения и момента наступления хорошей погоды при условии $\Delta P_{\text{к,изм}} \leq (P_{\text{к.х.п.м}} + \sigma_{\text{п}})$, где $\sigma_{\text{п}}$ — погрешность моделирования потерь на корону для хорошей погоды.

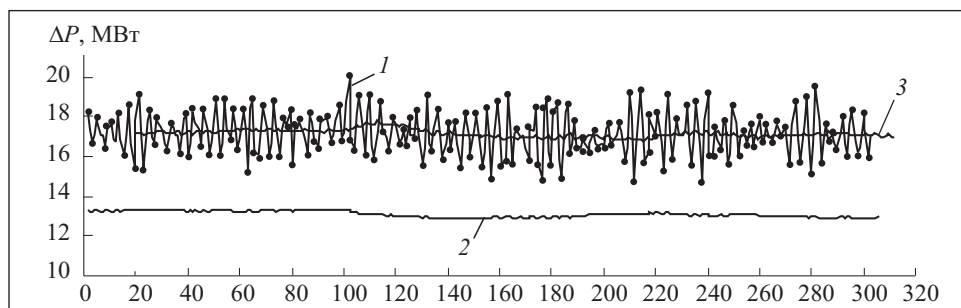


Рис. 4. Кривые потерь мощности с учетом сглаживания: 1 — разница активных мощностей на концах ВЛ; 2 — потери на нагрев проводов, полученные по математической модели; 3 — 20-линейный сглаживающий фильтр для разницы активных мощностей на концах ВЛ

Были измерены гармоники напряжения и тока, коэффициент искажения синусоидальности кривой межфазного напряжения, симметрия напряжения и тока и другие параметры режима, необходимые для анализа ВЛ СВН. Приборы и компьютеры на концах ВЛ синхронизированы по времени на лабораторной модели измерения параметров ВЛ. Для достижения синхронности измерений параметров режима на концах ВЛ внутренние таймеры персональных компьютеров синхронизированы по точному времени с использованием интернета.

Результаты статистической обработки и сглаживания свидетельствуют о том, что для измерения текущих потерь в ВЛ можно выбрать период сглаживания 60—80 с. При интервале усреднения активной мощности 1 с и периоде сглаживания 60—80 значений можно существенно уменьшить случайную составляющую погрешности (рис. 4).

Использование современных устройств, имеющих технические характеристики, аналогичные устройству SIMEAS Q для измерения активной мощности с периодом усреднения 1 с и классом точности 0,2, позволяет выполнять измерение текущих потерь активной мощности и выделение потерь на корону ВЛ СВН с достаточной для практики точностью.

Во время экспериментальных исследований в течение четырех суток наблюдались режимы передачи от 450 до 650 МВт при различных погодных условиях. В табл. 2. приведены результаты замеров характерных режимов ВЛ 500 кВ, где $\Delta P_{\text{изм}}$ — суммарные измеренные значения потерь активной мощности ВЛ, а в табл. 3 — результаты обработки таких замеров: минимальные и максимальные значения потерь в ВЛ, значения удельных потерь на корону, приведенные к номинальному напряжению, и время их наступления. Как видно из табл. 3, минимальное значение наблюдалось 21.02.2008 с четырех до 11 часов при времени усреднения 10 мин.

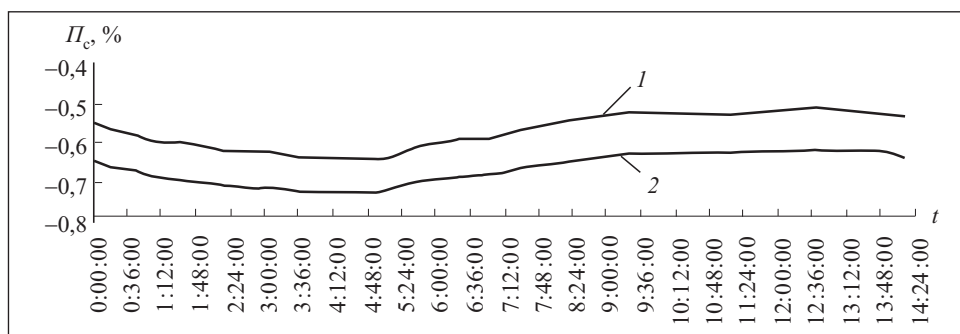


Рис. 5. Кривые систематических погрешностей измерения активной мощности ВЛ в реальных условиях: 1 — в начале ВЛ; 2 — в конце ВЛ; t — время измерения (часы: минуты: секунды)

Таблица 2

Номер замера	P_1 , МВт	P_2 , МВт	U_1 , кВ	U_2 , кВ	Q_1 , МВАр	Q_2 , МВАр	$\Delta P_{\text{изм}}$, МВт	Дата эксперимента	Время, ч: мин: с
1	461,50	450,80	502,67	455,42	162,76	291,88	10,70	20.02.08	03:30:00
2	562,71	546,72	502,90	445,21	237,08	315,48	15,99	20.02.08	00:00:00
3	615,76	596,55	497,94	431,74	296,08	332,74	19,21	20.02.08	19:50:00
4	651,57	630,10	497,94	428,87	327,24	333,74	21,47	19.02.08	20:50:00

Таблица 3

Номер замера	Дата эксперимента	Время, ч:мин:с	ΔP_{min} , МВт	ΔP_{max} , МВт	Интервал усреднения	$\Delta P_{\text{к0}}$, кВт/км
1	18.02.08	10:08:15—10:13:15	2,35	5,40	1 с	35,10
2	18.02.08	10:40:10—11:33:20	2,69	4,09	10 с	26,58
3	18.02.08	10:41:00—16:12:00	3,31	3,78	1 мин	24,57
4	18.02.08	16:30:00—23:55:00	3,43	4,07	5 мин	26,58
5	19.02.08	00:00:00—14:05:00	2,43	4,79	5 мин	31,14
6	19.02.08	14:50:00—23:50:00	3,08	4,07	10 мин	26,58
7	20.02.08	00:00:00—23:50:00	2,27	3,34	10 мин	21,71
8	21.02.08	04:00:00—11:10:00	1,69	3,14	10 мин	20,41

Интервал изменения потерь на корону и других составляющих в дни замеров колебался в пределах 1,69—5,4 МВт. Приведенные к номинальному напряжению ВЛ расчетные удельные потери на корону (кВт/км) вдоль ВЛ согласно (1) при $U_{1ном} = 500$ и $U_2 = 440$ кВ по данным в конце ВЛ соответствуют средним по трассе удельным потерям на корону, равным 10,42—35,1 кВт/км при номинальном напряжении.

При упрощенном моделировании потерь погрешность составляет 1,5 %. На рис. 5 приведены результаты оперативного моделирования систематических погрешностей систем измерений активных мощностей в начале и в конце ВЛ 500 кВ «2-я Апшеронская» по измерениям 19.02.2008 от 00:00:00 до 14:05:00ч.

Таким образом, с помощью оперативного моделирования систематических погрешностей системы измерения с учетом реальных условий эксплуатации и коррекции результатов измерения точность измерения активной мощности в начале ВЛ для наблюдаемых режимов удается улучшить на 0,6—0,72 % и в конце ВЛ на 0,5—0,64 %. Общая оценка относительного улучшения измерения активной мощности в дни замеров режимов составила 0,9 % от значения измеряемой мощности.

Систематическая погрешность системы измерения суммарных потерь активной мощности ВЛ СВН по результатам измерения 19.02.2008 от 00:00:00 до 14:05:00 составляет 0,08—0,11 %, а абсолютные значения изменяются от 0,45 до 0,8 МВт.

Выводы

Разработанные методика и программа оперативной оценки систематической погрешности позволяют выполнять измерения активной энергии системы в реальных условиях эксплуатации. Полученные результаты таких измерений свидетельствуют о том, что при измерении текущих потерь в ВЛ период усреднения, равный 10 с, может обеспечить практически приемлемую точность.

Результаты экспериментальных исследований одновременных измерений параметров режима на концах ВЛ 500 кВ автоматизированной системой, включающей интеллектуальные измерительные приборы и специализированные системы измерений с использованием ПК, свидетельствуют о достижении более высокой точности при оценке измерения потерь.

Моделирование фактических систематических погрешностей системы измерения с учетом реальных условий эксплуатации и коррекция результата измерения позволяют повысить точность измерения активной энергии. Общее относительное улучшение точности результата измерения активной мощности для ВЛ 500 кВ составило 0,5 — 0,9 % измеряемой мощности.

A model of an overhead AC power line has been proposed to estimate total active power losses and the allocation of the crown loss component of the overhead line. The requirements have been formulated for rapid assessment of active power losses on the current mode settings at the ends of the ultra-high voltage overhead lines. The measurement system, based on the evaluation of the systematic error of measurement of total losses and on its exclusion from the overall result, is presented. The results of the mode measurement and estimating the crown loss at the line of 500 kV on the basis of specialized measurement systems with personal computers are given.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баламетов А.Б. Модели и методы расчета установившихся режимов электрических сетей с учетом коронирования проводов. — Баку : Элм, 2005. — 355 с.
2. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Набиев Х.И. и др. О результатах измерения текущих параметров режима воздушной линии «2-я Апшеронская» // Проблемы энергетики. — 2009. — № 2. — С. 23—31.
3. Буравцов В.Н., Зимин Л.А., Толасов А.Г. и др. Измерение потерь мощности на корону и в проводах ВЛ 500 кВ Конаково — Трубино в режиме реального времени // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2007. — № 1. — С. 6—9.
4. Шаров Ю.В., Гаджиев М.Г. Измерение потерь мощности на корону в линиях сверхвысокого напряжения ОАО «ФСК ЕЭС» // Там же. — 2010. — № 3. — С. 19—23.
5. Дьяков Ф.А., Кононов Ю.Г. Новый подход к мониторингу гололедообразования на ВЛ 330 — 750 кВ // Энергетик. — 2009. — № 4. — С. 4—10.
6. Гаджиев М.Г. Анализ систематической погрешности измерения потерь на корону и в проводах в режиме реального времени // Электричество. — 2011. — № 3. — С. 30—36.
7. Тамазов А.И. О проблемах расчета потерь на корону воздушных линий электропередачи // Электричество. — 2009. — № 7. — С. 20—27.
8. Баламетов А.Б. Моделирование потерь мощности на корону в ВЛ СВН в установившихся режимах // Электричество. — 1995. — № 10. — С. 22—28.
9. Баламетов А.Б. Закономерности оптимального регулирования напряжения и реактивной мощности ВЛ СВН // Там же. — 1998. — № 9. — С. 2—9.
10. Balametov A.B., Halilov E.D. New possibilities of modeling of an error of a complex of measurement for increase of accuracy of the account of the electric power // The 8th Intern. Conf. on «Technical and Physical Problems of Power Engineering» (ICTPE-2012). September 5—7, 2012. — Ostfold University College, Fredrikstad, Norway. — P. 22—26.
11. Лачугин В.Ф., Тамазов А.И. Требования к системе измерений параметров режимов энергосистем // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2012. — № 2. — С. 8—14.
12. Баламетов А.Б. Коронирование проводов ВЛ СВН. Моделирование в установившихся режимах. — LAP Lambert Academic Publishing. — 2013. — 310 с.

Поступила 02.07.13;
после доработки 18.07.13

БАЛАМЕТОВ Аишаф Баламет оглы, д-р техн. наук, профессор, руководитель научного направления «Установившиеся режимы электроэнергетических систем» Азербайджанского научно-исследовательского проектно-изыскательского ин-та энергетики. В 1971 г. окончил Азербайджанский ин-т нефти и химии им. М. Азизбекова. Область научных исследований — установившиеся режимы электроэнергетических систем.

ХАЛИЛОВ Эльмар Дамир оглы, канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотр. Азербайджанского научно-исследовательского проектно-изыскательского ин-та энергетики. В 1984 г. окончил Азербайджанский госуниверситет. Область научных исследований — математическое моделирование в электроэнергетических системах.

НАБИЕВ Халил Искендер оглы, канд. техн. наук, гл. инженер управления «Производство энергии» ООО «Азерэнерджи». В 1971 г. окончил Азербайджанский ин-т нефти и химии им. М. Азизбекова. Область научных исследований — переходные процессы в электроэнергетических системах, качество электроэнергии.

ИЛЯСОВ Осман Вели оглы, нач. управления «Передача энергии» ООО «Азерэнерджи». В 1985 г. окончил Азербайджанский ин-т нефти и химии им. М. Азизбекова. Область научных исследований — режимы электроэнергетических систем.