

# Энергетическое обследование несинусоидальных режимов многопроводных линий электропередачи

ХАРЛОВ Н.Н., БОРОВИКОВ В.С., ЛИТВАК В.В., ПОГОНИН А. В., МЕЛЬНИКОВ В.А.

*Рассматриваются вопросы обследования линий электропередачи и оценки влияния уровней несинусоидальности напряжений и токов на эффективность транспорта электрической энергии. На основе оригинальных математических моделей, учитывающих распределенность параметров линий, геометрию подвески и марки проводов и тросов, рассчитываются эпюры распределения напряжений и токов гармонических составляющих вдоль трассы линии, определяются основные и добавочные потери активной мощности и энергии в линии.*

**Ключевые слова:** линия электропередачи, распределенность параметров, резонанс, потери, математическая модель

При проведении комплексного энергетического обследования электросетевых предприятий следует уделять внимание режимам работы высоковольтных линий электропередачи. В процессе обследования, как правило, проводятся измерения следующих параметров режима:

действующих значений фазных напряжений  $U(t)$  в контролируемом узле примыкания линии (суточные графики);

действующих значений фазных токов линии  $I(t)$  в месте примыкания линии к контролируемому узлу (суточные графики);

фазных мощностей  $P(t)$ ,  $Q(t)$  (активных и реактивных) в месте примыкания линии к контролируемому узлу (суточные графики);

спектров контролируемых напряжений и токов  $\dot{U}(w_n, t)$ ,  $\dot{I}(w_n, t)$ .

Как показывает опыт обследования режимов электрических сетей 110 кВ Сибири [1], подавляющее число линий имеют значительные искажения токов и, как следствие, искажения напряжений в

Число линий, %

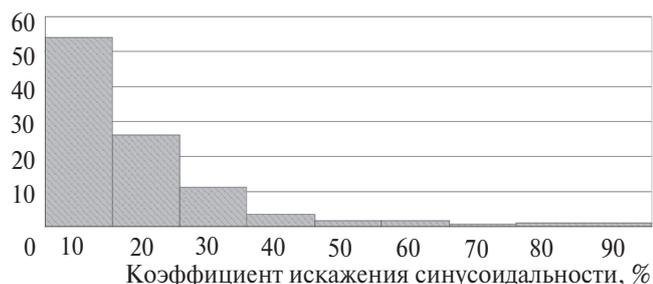


Рис. 1. Распределение линий по уровню коэффициента искажения синусоидальности тока

*Matters concerned with examination of power lines and estimation how the distortion of the sine-wave shape of voltages and currents influences the efficiency of electric power transmission are considered. Distributions of the harmonic components of voltages and currents along the power line route are calculated, and the main and additional losses of active power and energy in the power line are determined on the basis of mathematical models that take into account the distributed nature of power line parameters, suspension geometry, and type of phase conductors and overhead grounding wires.*

**Key words:** power line, distributed parameters, resonance, losses, mathematical model

контролируемых узлах. Распределение линий по уровню коэффициента искажения синусоидальности тока представлено на рис. 1.

Измерения несинусоидальности напряжений и токов очень важны, поскольку в линиях возможно возникновение процессов, близких к резонансу, со всеми вытекающими из этого последствиями [2, 3]: увеличение потерь активной мощности и энергии, повышение напряжений вдоль трассы линии, дополнительные искажения формы напряжения и тока и др. На рис. 2 приведены осциллограммы токов одной из линий 110 кВ, иллюстрирующие возникновение резонанса на частотах 5–7-й гармоник.

В ходе энергетического обследования необходимо на основе проведенных измерений рассчитать следующие режимные параметры, непосредственное измерение которых невозможно:

эпюры основной и высших гармонических составляющих напряжений и токов вдоль трассы линии;

добавочные потери активной мощности в линии, вызванные высшими гармоническими составляющими напряжений и токов.

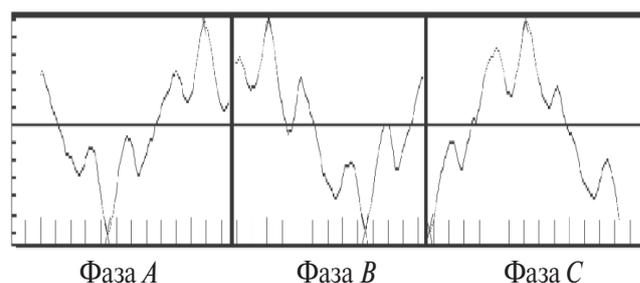


Рис. 2. Осциллограммы токов фаз А, В, С линии С-98 (подстанция «Одесская» – «Омскэнерго» 16 августа 2009г., 03:07 ч.)

Рассмотрим более подробно порядок проведения и основные результаты таких расчетов.

**Расчет эппюр гармонических составляющих напряжений и токов.** Как известно, распределение напряжений и токов вдоль многопроводной линии, содержащей  $m$  проводов и тросов, определяется следующей линейной системой матричных уравнений размерностью  $2m$  [4]:

$$\begin{aligned} \dot{U}(w_n) &= e^{-i u x} \dot{A} + e^{i u x} \dot{B}; \\ \dot{I}(w_n) &= e^{-i i x} \dot{C} + e^{i i x} \dot{D}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\dot{U}(w_n), \dot{I}(w_n)$  – векторы-столбцы напряжений и токов частоты  $n$ -й гармоники размерностью  $m \times 1$  в сечении на расстоянии  $x$  от контролируемого узла примыкания линии;  $\dot{I}_u(w_n) = \sqrt{\dot{Z}(w_n)\dot{Y}(w_n)}$ ;  $\dot{I}_i(w_n) = \sqrt{\dot{Y}(w_n)\dot{Z}(w_n)}$ ;  $\dot{Z}(w_n), \dot{Y}(w_n)$  – матрицы собственных и взаимных сопротивлений\* и проводимостей проводов и тросов на частоте  $n$ -й гармоники размерностью  $m \times m$ .

При расчете необходимо учитывать явление поверхностного эффекта в проводах. В соответствии с результатами исследований, изложенными в [5], активное сопротивление провода круглого сечения на частоте  $w_n$  определяется в зависимости от величины  $c = r_{\text{пр}} / 2\sqrt{\omega\mu\sigma/2}$ :

$$r_{0n} = r_{03} \left( 1 + \frac{c^4 \frac{\mu}{\sigma}}{3 \frac{\mu}{\sigma}} \right) \text{ при } c < 1$$

и

$$r_{0n} = r_{03} \left( c + \frac{1}{4} + \frac{3 \frac{\mu}{\sigma}}{64 c \frac{\mu}{\sigma}} \right) \text{ при } c > 1,$$

где  $r_0$  – активное сопротивление провода постоянному току.

Проведенные исследования сопротивлений витых многопроводных проводов [6] показали правомерность такого подхода к определению активного сопротивления проводов с учетом поверхностного эффекта.

Векторы-столбцы постоянных интегрирования  $\dot{A}(w_n), \dot{B}(w_n), \dot{C}(w_n), \dot{D}(w_n)$  размерностью  $m \times 1$  обычно вычисляются из граничных условий на частоте  $n$ -й гармоники [3]:

$$\begin{aligned} -\dot{Z}(w_n)\dot{I}_x(w_n) &= -\dot{I}_u e^{-i u x} \dot{A} + \dot{I}_u e^{i u x} \dot{B}; \\ -\dot{Y}(w_n)\dot{U}_x(w_n) &= -\dot{I}_i e^{-i i x} \dot{C} + \dot{I}_i e^{i i x} \dot{D}. \end{aligned} \quad (2)$$

Объединяя системы матричных уравнений (1) и (2) и решая полученную линейную систему размерностью  $4m$ , можно определить значения постоянных интегрирования при значениях  $\dot{U}_x(w_n)$  и  $\dot{I}_x(w_n)$ , равных значениям, измеренным в контролируемом узле примыкания линии, и при расстоянии  $x$  от контролируемого узла примыкания до точки расчета, равном нулю:

$$\begin{pmatrix} \dot{A} \\ \dot{B} \\ \dot{C} \\ \dot{D} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{E} & \dot{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{E} & \dot{E} \\ \dot{I}_u(w_n) & \dot{I}_u(w_n) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\dot{I}_i(w_n) & \dot{I}_i(w_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}(w_n) \\ \dot{I}(w_n) \\ \dot{Z}(w_n)\dot{I}(w_n) \\ \dot{Y}(w_n)\dot{U}(w_n) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Подставляя полученные значения постоянных интегрирования в (1) и изменяя  $x$ , рассчитываются эппюры  $\dot{U}_x(w_n), \dot{I}_x(w_n)$ .

Наиболее сложной процедурой при проведении расчетов по приведенным уравнениям является процедура вычисления функций от матриц типа:  $\dot{I}_u(w_n) = \sqrt{\dot{Z}(w_n)\dot{Y}(w_n)}$ ,  $\dot{I}_i(w_n) = \sqrt{\dot{Y}(w_n)\dot{Z}(w_n)}$ ,  $e^{-i u l}, e^{i u l}, e^{-i i l}, e^{i i l}$ . В дальнейшем вычисления данных функций проводятся с использованием теоремы Кэли–Гамильтона [7], в соответствии с которой матричная функция определяется по формуле:

$$f(A) = \frac{1}{D} \sum_{k=1}^n \mathbf{e}_k D_{n-k} A^{n-k}.$$

Здесь  $D$  – определитель Вандермонда  $\det \left| l_i^{k-1} \right|$ , а  $D_j$  – определитель, получаемый если в  $D$  вместо  $l_1^j, l_2^j, \dots, l_n^j$  подставить  $f(l_1), f(l_2), \dots, f(l_n)$ .

**Расчет добавочных потерь активной мощности в линии, вызванных высшими гармоническими составляющими напряжений и токов.** Потери активной мощности в проводах многопроводной линии в рамках используемой математической модели режима определяются по формуле:

$$DP = \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^N \mathbf{e}_i I_{i,n}^2(x) r_{0li} \sqrt{n} dx,$$

где  $I_{i,n}(x)$  – действующее значение тока  $n$ -й гармоники в  $i$ -м проводе на расстоянии  $x$  от места проведения измерений;  $r_{0li}$  – сопротивление  $i$ -го провода на основной частоте;  $\sqrt{n}$  – коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления провода вследствие явления поверхностного эффекта.

Потери от протекания тока первой гармоники являются основными потерями и определяются по формуле:

\* Здесь и далее – все сопротивления на единицу длины.

$$DP_1 = e \tau \sum_{i=1}^m I_{i,1}^2(x) r_{0li} dx. \quad (4)$$

Потери, обусловленные протеканием токов высших гармонических, – добавочные потери:

$$DP_{доб} = e \tau \sum_{i=n=2}^N I_{i,n}^2(x) r_{0li} \sqrt{n} dx. \quad (5)$$

Значение добавочных потерь в линии определяется такими факторами, как гармонический состав и значение токов высших гармоник, их распределение вдоль трассы линии, сопротивления проводов и тросов, а также возможные вариации параметров линий в окрестности их паспортных значений [8]. Для определения возможных значений добавочных потерь, их соотношения с потерями от основной гармоники тока необходимо проведение соответствующих расчетов. В качестве примера такие расчеты проведены применительно к линии ОКК-120 «Бурятэнерго» длиной 63,7 км, выполненной проводом АС-120/19 на опорах типа П110-5 со стальным тросом марки С50. Представление о степени искажения формы кривой напряжения и тока в начале линии (шины 110 кВ подстанции «Кяхта») дают графики суточных изменений коэффициентов искажения синусоидальности напряжения и тока (рис. 3).

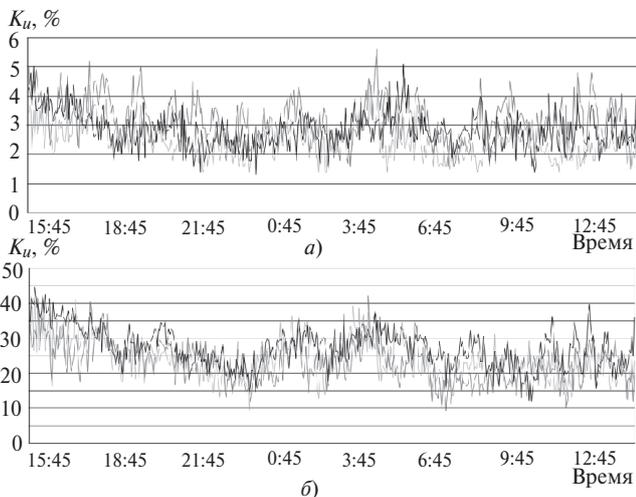


Рис. 3. Суточные графики изменения коэффициентов искажения синусоидальности: а – напряжения на шинах 110 кВ п/ст «Кяхта»; б – тока в начале линии 110 кВ ОКК-120 (п/ст «Кяхта» – п/ст «Окино-Ключи»)

Преобладающими высшими гармоническими составляющими напряжения и тока в данном случае являются 3, 5 и 7-я гармоники, причем значение 5-й гармоники – наибольшее.

Проведенные расчеты показывают значительную неравномерность распределения напряжений и токов высших гармонических вдоль трассы линии. На рис. 4 приведены эпюры распределения

фазных напряжений и токов вдоль трассы линии, рассчитанные по (3) и (4).

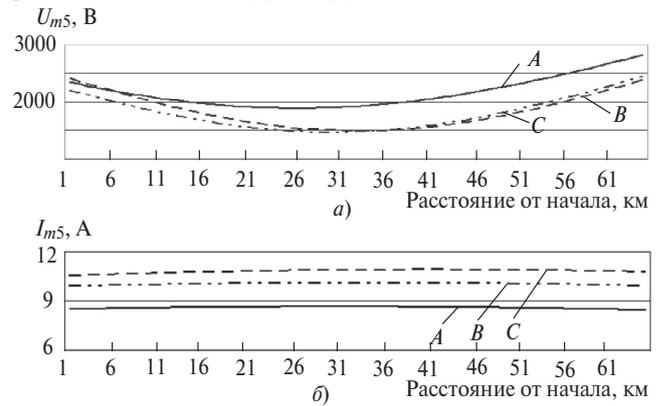


Рис. 4. Эпюры распределения фазных напряжений (а) и фазных токов (б) пятой гармоники по всей длине линии ОКК-120

Потери активной мощности в линии в течение суток рассчитываются по (5) (рис. 5). В отдельные моменты времени значение добавочных потерь может составлять 30% значения основных потерь.

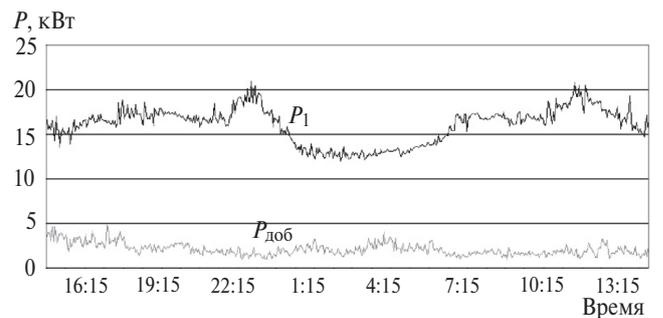


Рис. 5. Суточные графики изменения основных и добавочных потерь в линии ОКК-120

Проведенные расчеты потерь активной энергии в линии на суточном интервале показывают, что основные и добавочные потери в данном случае составляют 378,2 и 49,7 кВтч соответственно. Уровень добавочных потерь электроэнергии составил 13,1 % основных потерь энергии.

**Влияние вариации параметров линии электропередачи на уровень потерь.** Пределы вариации электрических параметров линии электропередачи рассмотрены в [8]. В данном случае установлено, что пределы вариации координат подвеса проводов и тросов, а также их сечений не превосходят 2%. Влияние данных вариаций на размер основных и добавочных потерь в линии оценивалось при проведении статистических испытаний, причем распределение варьируемых параметров в пределах  $\pm 1\%$  паспортных данных принято равномерным на интервале вариации. На рис. 6 приведены гистограммы распределения основных и добавочных суточных потерь энергии в линии ОКК-120, полученные в ходе 100 статистических испытаний. Математическое ожидание в данном случае равно для

основных потерь 478,2 кВт·ч и для добавочных 49,7 кВт·ч, что полностью совпадает с расчетом потерь по паспортным данным. Среднеквадратическое отклонение равно 2,644 и 0,966 кВт·ч соответственно. Значения вариации основных потерь относительно математического ожидания составили от  $-6,49$  до  $+7,30$  кВт·ч, что составляет  $-1,72$  и  $1,93$  %; то же для добавочных потерь — от  $-1,83$  до  $+2,44$  кВт·ч, что составляет  $-3,7$  и  $4,9$  %.

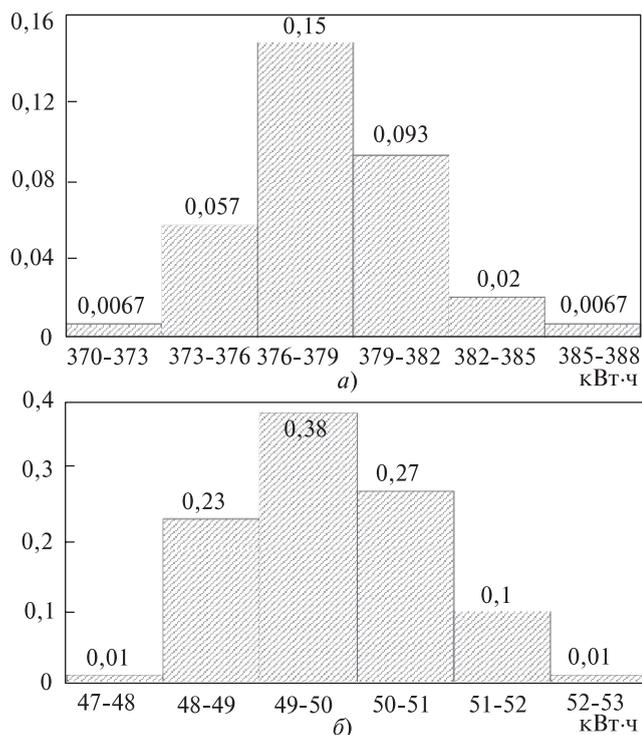


Рис. 6. Гистограмма распределения потерь электроэнергии в линии ОКК-120: а — основных; б — добавочных

**Выводы.** 1. В ходе проведения энергетического обследования электросетевых предприятий необходимо проводить оценку эффективности транспорта электрической энергии по каждой из обследуемых линий. Одним из показателей эффективности транспорта электрической энергии должны рассматриваться добавочные потери, возникающие вследствие искажений формы кривых напряжений и токов в линии. Как показывает опыт проведения таких обследований, выполненных на значительном числе линий 110 кВ Сибири, оценку добавочных потерь следует выполнять на всех обследуемых линиях.

2. Значение добавочных потерь в линии, вызываемых искажениями формы кривой напряжений и токов, может быть определено только расчетным путем. Основой для проведения расчетов добавочных потерь и определения показателей эффективности транспорта электрической энергии являются эпюры распределения фазных токов высших гармонических составляющих вдоль трассы линии.

Предположенный подход учитывает распределенность параметров линии и взаимосвязи режимных параметров вдоль трассы и обеспечивает расчет таких эпюр как для основной, так и для высших гармонических составляющих.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровиков В.С., Волков М.В., Иванов В.В. и др. Опыт корпоративного обследования электрических сетей 110 кВ Сибири. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010.
2. Харлов Н.Н., Иванов В.В., Погонин А.В., Мельников В.А. Формирование уравнений установившихся несинусоидальных режимов электрических систем с учетом распределенности параметров. — Изв. Томского политехнического университета, 2009, т. 314, № 4.
3. Харлов Н.Н. Резонансные режимы многопроводных линий электропередачи. — Электричество, 2009, № 12.
4. Базуткин В.В., Дмоховская Л.Ф. Расчеты переходных процессов и перенапряжений. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.2. — Л.: Энергия, 1967.
6. Демирчян К.С., Кузнецов И.Ф., Боронин В.Н. Поверхностный эффект в электроэнергетических устройствах. — Л.: Наука, 1983.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1974.
8. Заславская Т.Б., Ирлахман М.Я., Ловягин В.Ф. Пределы вариаций электрических параметров симметричной линии электропередачи. — Труды СибНИИЭ, 1970, вып. 17.

[04.02.11]

*Авторы: Харлов Николай Николаевич окончил электрорадиотехнический факультет Омского политехнического института (ОмПИ) в 1973 г. В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию в Киевском политехническом институте. Заместитель директора Регионального учебно-научно-технологического центра ресурсосбережения (РУНТЦР) Томского политехнического университета (ТПУ).*

*Боровиков Вячеслав Сергеевич окончил электротехнический институт ТПУ в 2009 г. Инженер РУНТЦР ТПУ.*

*Литвак Валерий Владимирович окончил электроэнергетический факультет Томского политехнического института в 1962 г. В 2003 г. защитил докторскую диссертацию «Проблемы энергосбережения и методы их решения в регионах» в ТПУ. Профессор, ведущий научный сотрудник.*

*Погонин Андрей Владимирович окончил физический факультет Дальневосточного государственного университета в 1986 г. Начальник управления эксплуатации и метрологии ОАО «Межрегиональная распределительная сетевая компания (МРСК) Сибири».*

*Мельников Василий Александрович окончил электротехнический факультет ОмПИ в 1985 г. Начальник департамента технической инспекции ОАО МРСК Сибири.*