

Г.А Сендерович, А.В. Дяченко

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

*Запропоновано метод кореляції коливань потужності і напруги, який дозволяє визначати місце розташування джерела коливань напруги в системі електропостачання.* Бібл. 5, рис. 4.

*Ключові слова:* якість електроенергії, показники якості електроенергії, коливання напруги, джерело коливання напруги, крива зміни напруги, крива зміни активної потужності, визначення відповідальності.

*Предложен метод корреляции колебаний мощности и напряжения, который позволяет определять место расположения источника колебаний напряжения в системе электроснабжения.* Библ. 5, рис. 4.

*Ключевые слова:* качество электроэнергии, показатели качества электроэнергии, колебания напряжения, источник колебания напряжения, кривая изменения напряжения, кривая изменения активной мощности, определения ответственности.

**Введение.** С точки зрения определения участия субъектов в ответственности за нарушение требований качества электроэнергии (КЭ) при определении источников колебаний напряжения (КН) в системе электроснабжения потребителей, имеющих световую нагрузку, основным вопросом является расположение источника КН: на территории потребителя или во внешней сети. Ответ на этот вопрос, подтвержденный детерминированным расчетом, может служить основой экспертного заключения для решения правовых споров при оценке ущербов, вызванных низким качеством электрической энергии.

Речь идет о систематических КН, которые носят повторяющийся характер, и которые можно на каком-то интервале времени измерения  $T$  охарактеризовать числом изменений напряжения  $m$ , частотой повторения изменений напряжения  $F_{\delta U}$  и другими показателями, соответствующими КН [1].

Источниками КН являются мощные электроприемники с импульсным, резкопеременным характером потребления активной и реактивной мощности: дуговые и индукционные печи; электросварочные машины; электродвигатели при пуске.

**Постановка задачи.** С точки зрения потребителя источник КН может располагаться в его электрических сетях либо в сетях других потребителей. В первом случае, если систематические КН превосходят допустимые значения, потребитель должен предпринять меры по снижению уровня колебаний. Во втором – КН у потребителя определены внешним фактором, так как поступают к нему по сетям поставщика электроэнергии. В этом случае ответственным за проведения мероприятий по снижению уровня КН является поставщик.

**Целью работы** является разработка метода определения места нахождения источника КН.

Информацию, необходимую для определения положения источника КН, можно получить путем анализа параметров текущего режима электрической сети. Как известно, регулирующий эффект активной нагрузки по напряжению практически всегда положителен [2].

$$\frac{\partial P_{load}}{\partial U} > 0. \quad (1)$$

Поэтому уменьшение напряжения, вызываемое внешними причинами, приведет к снижению активной мощности нагрузки. Соответственно, увеличение напряжения, вызываемое внешними причинами, приведет к увеличению активной мощности нагрузки.

Что касается реактивной мощности, то регулирующий эффект реактивной нагрузки по напряжению также положителен ( $\partial Q_{load} / \partial U > 0$ ) если напряжение превышает критического значения ( $U > U_{cr}$ ). При глубоких провалах напряжения ( $U < U_{cr}$ ) регулирующий эффект реактивной нагрузки по напряжению становится отрицательным ( $\partial Q_{load} / \partial U < 0$ ). Учитывая, что для шин 110 кВ критическое напряжение может достигать величины порядка  $0,8U_{nom}$  [2], возможность использования изменения реактивной мощности в качестве критерия должна быть подтверждена дополнительными исследованиями.

Если изменение напряжения вызвано внутренними причинами, то для рассматриваемого объекта понижение напряжения является не причиной изменения других параметров режима, а следствием.

**Результаты исследований.** Представим питание потребителя в виде схемы замещения (рис. 1), в которой  $\underline{E}_{syst}$  – эквивалентная ЭДС системы;  $\underline{U}$  – напряжение на шинах приемной подстанции;  $Z_{syst}$  – эквивалентное сопротивление связи с системой;  $Z_{load}$  – эквивалентное сопротивление нагрузки предприятия.

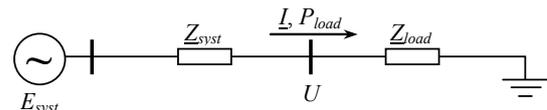


Рис. 1. Эквивалентная схема питания потребителя

Изменение напряжения  $\underline{U}$  на шинах приемной подстанции, вызванное внешними по отношению к электрической сети потребителя воздействием, можно рассматривать как следствие изменения ЭДС системы  $\underline{E}_{syst}$ . При допущении о неизменности сопротивления нагрузки ( $Z_{load} = const$ ) снижение  $E_{syst}$  приводит к уменьшению тока  $I$  по линии и мощности нагрузки потребителя  $P_{load}$ , повышение  $E_{syst}$  – к увеличению  $I$  и  $P_{load}$ . На самом деле, при изменении напряжения  $\underline{U}$  сопротивление нагрузки  $Z_{load}$  может несколько меняться, но в общем случае это изменение будет соответствовать положительному регулируемому эффекту активной нагрузки по напряжению [4, 5].

Если источник КН расположен в электрической сети потребителя, то изменения напряжения  $\underline{U}$  на шинах приемной подстанции происходит по причине меняющейся нагрузки при постоянной ЭДС системы

( $E_{\text{sys}} = \text{const}$ ). Величина напряжения  $U$  будет определяться потерей напряжения на сопротивлении связи с системой  $Z_{\text{sys}}$  [5]. Если пренебречь поперечной составляющей падения напряжения, что характерно для распределительных сетей, то можно записать:

$$U = E_{\text{sys}} - \frac{P_{\text{load}} \cdot r_{\text{sys}} + Q_{\text{load}} \cdot x_{\text{sys}}}{U}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{load}}$ ,  $Q_{\text{load}}$  – мощности активной и реактивной нагрузки потребителя.

В соответствии с (2) обязательным условием уменьшения напряжения  $U$  на шинах приемной подстанции при  $E_{\text{sys}} = \text{const}$  является увеличение потери напряжения в эквивалентной связи с системой и, значит, числителя в дробной части формулы:

$$\left[ (P_{\text{load}} + \Delta P_{\text{load}}) \cdot r_{\text{sys}} + (Q_{\text{load}} + \Delta Q_{\text{load}}) \cdot x_{\text{sys}} \right] - (P_{\text{load}} \cdot r_{\text{sys}} + Q_{\text{load}} \cdot x_{\text{sys}}) > 0, \quad (3)$$

где  $\Delta P_{\text{load}} + j\Delta Q_{\text{load}}$  – приращение мощности нагрузки, вызвавшее КН.

Увеличение  $U$  будет наблюдаться в том случае, когда неравенство (3) поменяет свой знак. А это возможно, если приращения мощности будут отрицательными ( $\Delta P_{\text{load}} < 0$ ;  $\Delta Q_{\text{load}} < 0$ ).

Отсюда вытекают условия изменения мощности нагрузки, вызывающей КН. При отрицательном изменении напряжения  $\Delta U$ :

$$\begin{cases} \Delta U < 0; \\ \Delta P_{\text{load}} \cdot r_{\text{sys}} + \Delta Q_{\text{load}} \cdot x_{\text{sys}} > 0, \end{cases} \quad (4)$$

при положительном изменении напряжения  $\Delta U$ :

$$\begin{cases} \Delta U > 0; \\ \Delta P_{\text{load}} \cdot r_{\text{sys}} + \Delta Q_{\text{load}} \cdot x_{\text{sys}} < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Условие (5) является обязательным для возникновения КН при расположении источника в сетях потребителя, но не является достаточным. Вывод достаточного условия в поставленной задаче не требуется, так как целью является не установление факта КН (КН фиксируется путем измерений), а определение места расположения источника.

Причины возникновения КН при расположении источника как в питающих сетях, так и в сетях потребителя, связаны с изменениями потребления и активной и реактивной мощностей. В качестве критерия для определения места расположения источника КН выбираем изменение величины активной мощности, получаемой приемной подстанцией по эквивалентной связи с системой.

Источник КН является *внешним* для потребителя, если возникновение КН приводит к согласованным изменениям напряжения и потребляемой по линии активной мощности, что соответствует условию положительного регулирующего эффекта активной нагрузки по напряжению (1).

Источник КН является *внутренним* для потребителя, если возникновение КН приводит к встречным изменениям напряжения и потребляемой по линии активной мощности, что внешне напоминает условие отрицательного регулирующего эффекта активной нагрузки по напряжению:

$$\frac{\partial P_{\text{load}}}{\partial U} < 0. \quad (6)$$

Условия (1) и (6) соответствуют статическим характеристикам нагрузки и могут быть использованы

при отсутствии в нагрузке потребительской двигательной составляющей. В общем случае, с учетом динамических характеристик двигателей, критерии для определения места расположения источника КН требуют уточнения, так как кривые изменения напряжения  $U(t)$  и активной мощности  $P_{\text{load}}(t)$  могут иметь сдвиг по времени  $t$ . Коэффициент  $k_d$ , учитывающий отличия динамической характеристики от статической, обычно находится в пределах  $k_d = 0.7 \div 1$  [3]. Физический смысл коэффициента – отношение времен разгона (или торможения)  $k_d = t_{st}/t_{dyn}$ , определенных по статической ( $t_{st}$ ) и по динамической ( $t_{dyn}$ ) характеристикам. В условиях регулярных КН в распределительных сетях, когда размах изменения напряжения  $\delta U_i$  не столь велик, чтобы приводить к отказам оборудования, и постоянные инерции на много ниже, чем на межсистемных связях, следует ожидать значения  $k_d$  близкие к единице. В тоже время, в интервалах усреднения, близких к экстремумам, вместо критерия (1) может быть ложно зафиксирован критерий (6). Вероятность ошибки возрастает с увеличением частоты повторения изменений напряжения  $F_{\delta U_i}$ .

Для учета возможного сдвига между экстремумами кривых изменения напряжения  $U(t)$  и мощности  $P_{\text{load}}(t)$  целесообразно производить параллельный анализ этих характеристик. Рассмотрим характеристику изменения среднеквадратичного напряжения на шинах потребителя  $U$ . Для упрощения анализа допустим, что кривая изменения напряжения  $U(t)$  имеет произвольную форму непрерывного характера (рис. 2).

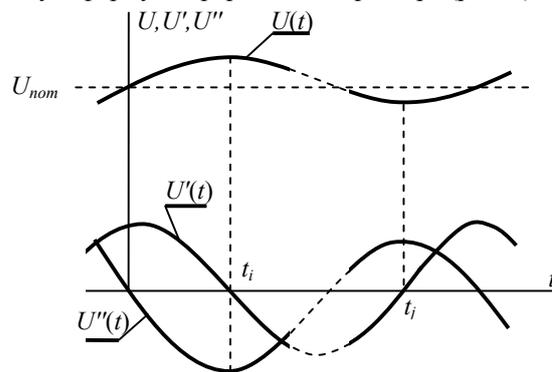


Рис. 2. Характеристики колебаний напряжения  $U(t)$ , первой  $U'(t)$  и второй  $U''(t)$  производных напряжения

Сглаженная форма колебаний, в той или иной степени, предполагается в любом случае, так как при получении информации будет производиться интегрирование мгновенных значений параметров режима за интервал усреднения  $\tau$ . Минимальное значение  $\tau$  должно быть достаточно для преобразования мгновенных значений напряжения  $u$  в среднеквадратичное  $U$  (порядка одного периода основной частоты).

В рассматриваемой задаче следует ориентироваться на интервал усреднения  $\tau$ , что согласно с ГОСТ [1], соответствует требованиям для других показателей качества электрической энергии, которые представляют продолжительные изменения характеристик напряжения (коэффициенты несимметрии напряжений по обратной  $K_{2U}$  и нулевой  $K_{0U}$  последовательностям, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$  коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$ ).

Какой бы ни была кривая изменения напряжения  $U(t)$ , в условиях регулярных КН ей присуще наличие локальных экстремумов (см. рис. 2). Условия наличия экстремума известны [4]. *Необходимым условием экстремума* функции  $U(t)$  в точке  $t_i$  является то, что ее производная в этой точке  $U'(t_i)$  либо равна нулю, либо не существует.

Если в точке  $t = t_i$  функция  $U(t)$  имеет экстремум, причем это максимум, то при переходе через точку  $t_i$  производная меняет свой знак с плюса на минус; если в точке  $t = t_j$  функция  $U(t)$  имеет минимум, – с минуса на плюс. Если производная  $U'(t)$  при переходе через точку  $t_i$  не меняет знак, то экстремума в точке  $t = t_i$  нет.

Оценить знак экстремума можно при помощи второй производной. Если в точке  $t_i$  достигается экстремум, причем  $U''(t_i) < 0$ , то в точке  $t = t_i$  функция  $U(t)$  имеет максимум; если  $U''(t_j) > 0$ , то в точке  $t = t_j$  функция  $U(t)$  достигает минимума.

Известные методы анализа кривых, имеющих локальные экстремумы, можно использовать для оценки колебаний напряжения и мощности и, в частности, для определения места расположения источника КН в соответствии с критериями (1), (6) и с учетом динамических характеристик двигательной нагрузки.

Допустим, что кривая изменения активной мощности  $P(t)$  подобна кривой напряжения  $U(t)$  и отсутствует сдвиг по времени ( $\Delta t_{dyn} = t_{dyn} - t_{st} = 0$ ), определяемый отличием статических и динамических характеристик (рис. 3). Тогда локальным экстремумам кривой  $U(t)$  будут соответствовать локальные экстремумы кривой  $P(t)$ . В точках экстремумов  $t = t_i$ ,  $t = t_j$  первые производные должны быть равны нулю:

$$U'(t_i) = U'(t_j) = P'(t_i) = P'(t_j) = 0. \quad (7)$$

Если источник КН находится в системе, максимумам  $U(t)$  будут соответствовать максимумы  $P(t)$  минимумам – минимумы (рис. 3,а). Знаки первых производных  $U'(t)$  и  $P'(t)$  должны быть одинаковы на протяжении всего интервала времени измерения  $T$ :

$$\begin{aligned} \text{sign}U'(t_i) &= \text{sign}P'(t_i); \\ \text{sign}U'(t_j) &= \text{sign}P'(t_j). \end{aligned} \quad (8)$$

Вторые производные в точках экстремумов должны совпадать по знаку:

$$\begin{aligned} \text{sign}U''(t_i) &= \text{sign}P''(t_i); \\ \text{sign}U''(t_j) &= \text{sign}P''(t_j). \end{aligned} \quad (9)$$

Если источник КН находится в сети потребителя, максимумам  $U(t)$  будут соответствовать минимумы  $P(t)$ , минимумам – максимумы (рис. 3,б). Знаки первых производных  $U'(t)$  и  $P'(t)$  должны быть противоположны на протяжении всего интервала времени измерения  $T$ :

$$\begin{aligned} \text{sign}U'(t_i) &= -\text{sign}P'(t_i); \\ \text{sign}U'(t_j) &= -\text{sign}P'(t_j). \end{aligned} \quad (10)$$

Вторые производные в точках экстремумов должны быть противоположны по знаку:

$$\begin{aligned} \text{sign}U''(t_i) &= -\text{sign}P''(t_i); \\ \text{sign}U''(t_j) &= -\text{sign}P''(t_j). \end{aligned} \quad (11)$$

Учет динамических характеристик двигательной нагрузки дает сдвиг кривой мощности  $P(t)$  относительно кривой напряжения  $U(t)$  на время задержки  $\Delta t_{dyn} = t_{dyn} - t_{st}$  (рис. 4). Соответственно локальные экстремумы кривой  $P(t)$  будут сдвинуты относительно экстремумов кривой  $U(t)$  на время  $\Delta t_{dyn}$ . По этой причине в зоне сдвига показанные выше зависимости (см. рис. 3) могут не соблюдаться и не будут работать критерии (1), (6).

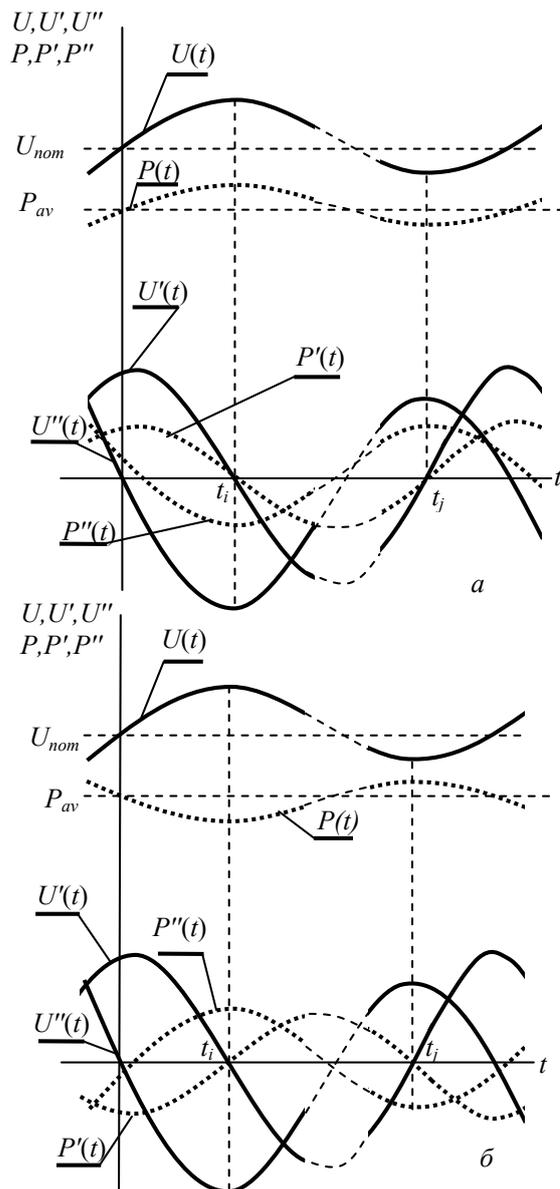


Рис. 3. Характеристики колебаний напряжения  $U(t)$  и активной мощности  $P(t)$ , их первой  $U'(t)$ ,  $P'(t)$  и второй  $U''(t)$  и  $P''(t)$  производных при расположении источника КН: а – в системе электроснабжения; б – в сети потребителя

Следует отметить, что сдвиг может наблюдаться за счет двигательной нагрузки потребителя при расположении источника КН в системе. Если источник КН расположен в сетях потребителя, то КН являются следствием изменения мощности нагрузки (2). Постоянная электромагнитного переходного процесса в линии электропередачи распределительной сети незначительна, сдвиг можно не учитывать.

В общем случае для определения места расположения источника КН, видимо, следует производить параллельный анализ кривых напряжения  $U(t)$  и активной мощности  $P(t)$  на протяжении всего интервала времени измерения  $T$ , отслеживая и сопоставляя особенности их изменения.

При практическом анализе информация о параметрах режима, поступающая от регистратора в виде дискретной записи мгновенных значений токов и напряжений с интервалом дискретности, обеспечивающим заданный класс точности, и, соответственно,

конечным количеством замеров, (например в АНТЭС АР-3Ф – 100 замеров за период). Использовать информацию о среднеквадратичном напряжении и активной мощности можно для выделенного интервала усреднения  $\tau$ . Методика определения места расположения источника КН предполагает использовать основные признаки изменения (7)÷(11) кривой мощности  $P(t)$  относительно кривой напряжения  $U(t)$  при их дискретной реализации.

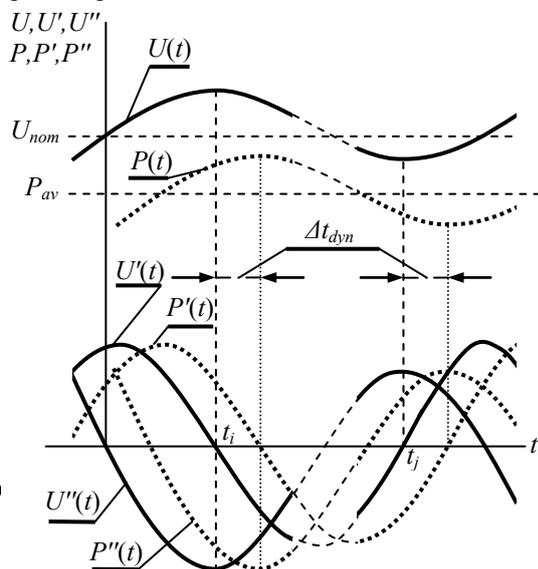


Рис. 4. Учет динамических характеристик двигательной нагрузки

#### Выводы.

1. Разработан метод определения места нахождения источника КН в электрической сети, который, работает по принципу оценки корреляции изменения мощности и напряжения в сети электроснабжения.

2. Метод позволяет учитывать сдвиг между экстремумами кривых изменения напряжения  $U(t)$  и мощности  $P_{load}(t)$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – [Введ. в Украине 01.01.2000]. – Минск: ИПК. Изд-во стандартов, 1998. – 30 с. – (Межгосударственный стандарт стран СНГ).
2. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1986. – 723 с.
5. Сендерович Г.А., Дяченко А.В. Актуальность определения ответственности за нарушение качества электроэнергии по показателям колебаний напряжения // Электротехника и электромеханика. – 2016. - №2. - С. 54-60. doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.10.

#### REFERENCES

1. GOST 13109-97. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 13109-97. Electrical energy.

Technical equipment electromagnetic compatibility. Quality standards for electrical energy in general use power systems]. Minsk, IPK Publishing house of standards, 1998. 30 p. (Rus).

2. Idelchik V.I. *Elektricheskie sistemy i seti: Uchebnik dlia vuzov* [Electrical Systems and Grids: Textbook for high schools]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1989. 592 p. (Rus).
3. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh: Ucheb. dlia elektroenerget. spets. vuzov* [Transitional electromechanical processes in electrical systems: Textbook for electric. specialist. high schools]. Moscow, High School Publ., 1985. 536 p. (Rus).
4. Bronshteyn I.N., Semendyayev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov* [Mathematical handbook for engineers and university students]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 723 p. (Rus).
5. Senderovich G.A., Diachenko A.V. The relevance of determining responsibility for violation of power quality in terms of voltage fluctuations. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.2, pp. 54-60. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.10.

Сендерович Геннадий Аркадиевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Дяченко Александр Васильевич<sup>1</sup>, аспирант,  
<sup>1</sup>Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел/phone +38 095 2098150,  
e-mail: senderovich@mail.ru, alex.7491@mail.ru

G.A. Senderovich<sup>1</sup>, A.V. Diachenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### A method for determining location of voltage fluctuations source in electric grid.

**Purpose.** The purpose of work is development of a method of definition of the location of a source of fluctuations of voltage.

**Methodology.** The reasons of emergence of fluctuations of voltage at an arrangement of a source both in power lines, and in the consumer's networks, are connected with changes of consumption and active and reactive capacities. As criterion for definition of the location of a source of fluctuations of voltage we choose change of size of the active power received by reception substation on equivalent communication with system. The source of fluctuations of voltage is external for the consumer if emergence of fluctuations of voltage leads to the coordinated changes of tension and consumed in the area of active power that corresponds to a condition of the positive regulating effect of active loading on voltage (1). The source of fluctuations of voltage is internal for the consumer if emergence of fluctuations of voltage leads to counter changes of tension and consumed in the area of active power that resembles a condition of the negative regulating effect of active loading on voltage superficially (6). **Results.** The method of definition of the location of a source of fluctuations of voltage in an electric network which, works by the principle of an assessment of correlation of change of power and tension in a power supply network is developed. The method allows to consider shift between extrema of curves of change of voltage of  $U(t)$  and power of  $P_{load}(t)$ . **Originality.** The method of definition of an arrangement of a source of fluctuations of voltage is developed. **Practical value.** The answer to this question where the source of fluctuations of voltage (in the territory of the consumer is located or in an external network) confirmed with the determined calculation, can form a basis of the expert opinion for the solution of legal disputes at an assessment of the damages caused by poor quality of electric energy. References 5, figures 4.

**Key words:** quality of the electric power, indicators of quality of the electric power, fluctuation of voltage, source of fluctuation of voltage, curve of change of voltage, curve of change of active power, definition of responsibility.