

---

# ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СУДЕБНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

---

Научная статья

УДК 614.841; DOI: 10.61260/2304-0130-2025-2-4-14

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ И ПРИМЕРЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ПОЖАРНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЕ УСТАНОВИВШИХСЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

✉ Агунов Михаил Викторович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия;

Вербова Наталья Михайловна.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

✉ [mag@igps.ru](mailto:mag@igps.ru)

*Аннотация.* Предложен новый подход к экспертному анализу установившихся режимов электрических цепей, использующий понятие комплексного аналитического напряжения. Анализ базируется на представлении о том, что ток в электрической цепи протекает в результате действия этого аналитического напряжения. Действительное напряжение, приложенное к электрической цепи, а также напряжение, связанное с ним преобразованием Гильберта, являются результатом векторного разложения аналитического напряжения по ортогональным составляющим. Предложенный подход позволяет избежать неоднозначности оценки установившихся режимов электрической цепи в случаях несовпадения формы приложенного к цепи напряжения с формой протекающего по цепи тока.

*Ключевые слова:* электрические цепи, аналитическое напряжение, преобразование Гильберта, установившиеся режимы, несинусоидальные режимы, полная мощность, активная мощность, реактивная мощность, мощность искажения

**Для цитирования:** Агунов М.В., Вербова Н.М. Аналитическое напряжение и примеры его использования при пожарно-технической экспертизе установившихся несинусоидальных режимов электрических цепей // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2025. № 2. С. 4–14. DOI: 10.61260/2304-0130-2025-2-4-14.

### Введение

Целью пожарно-технической экспертизы установившихся несинусоидальных режимов электрических цепей является необходимость оценки энергетических характеристик системы «источник – нагрузка» для обнаружения в ней пожароопасных явлений, а также выработки рекомендаций по обеспечению пожарной безопасности элементов системы.

Несинусоидальные режимы электрических цепей обусловлены прогрессирующим внедрением силовой электроники в быту, на промышленных предприятиях, в частности в сварочном производстве, на железнодорожном транспорте, судах, летательных аппаратах, буровых установках и т.п. Несинусоидальные режимы связаны с существенными искажениями сетевого напряжения и тока. Они характеризуются наличием в электрической сети высших гармоник тока, которые в свою очередь вызывают ускоренное старение изоляции, резонансы, приводящие к перенапряжениям, повышенный нагрев элементов электрической цепи и другие пожароопасные явления.

При несинусоидальных режимах под действием приложенного к электрической цепи питающего напряжения  $u(t)$  в ней протекает ток, форма которого в общем случае может не совпадать с формой приложенного напряжения.

Достаточно явно это стало наблюдаться с появлением в начале XX в. силовых вентильных преобразователей электроэнергии для электрической тяги, и уже с этого момента были предприняты попытки разработать методы анализа таких цепей [1–4].

С появлением силовых полупроводниковых преобразователей и широким повсеместным внедрением их в качестве источников вторичного электропитания проблема поиска методов анализа электрических цепей с несинусоидальными режимами обострилась и приобрела массовый характер [5–11].

Слабым местом предложенных методов являлась неопределенность их оценки, а зачастую они давали и противоположные результаты. Это заставило исследователей продолжить поиски, которые продолжаются и в XXI в. [12–25].

### Теоретическая база

Предлагаемый подход позволяет избежать неоднозначности оценки установившихся режимов электрической цепи, используя понятие комплексного аналитического напряжения, и полагая, что ток в цепи протекает в результате действия этого напряжения [26]. Действительному напряжению  $u(t)$  ставят в соответствие некое комплексное аналитическое напряжение:

$$U(t) = A(t) \cdot \psi(t) = u(t) + ju_1(t),$$

где  $A(t)$  – огибающая;  $\psi(t)$  – мгновенная фаза;  $u_1(t)$  – функция, сопряженная напряжению  $u(t)$ .

Сопряженная напряжению  $u(t)$  функция  $u_1(t)$  должна удовлетворять следующим требованиям:

– малым изменениям исходного напряжения  $u(t)$  должны соответствовать малые изменения мгновенной амплитуды

$$A(t) = \sqrt{u^2(t) + u_1^2(t)}$$

и мгновенной фазы

$$\psi(t) = m\pi + \arctg \frac{u_1(t)}{u(t)};$$

– при неизменной форме напряжения его фаза не должна зависеть от амплитуды;

– для гармонических напряжений понятия мгновенной амплитуды, мгновенной фазы и мгновенной частоты

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

должны приводить к обычным понятиям амплитуды, фазы и частоты.

Таким требованиям удовлетворяет единственная функция  $u_1(t)$ , связанная с исходной  $u(t)$  преобразованиями Гильберта [27]:

$$u_1(t) = H\{u(t)\} = -\frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{u(t+\tau) - u(t-\tau)}{\tau} d\tau;$$

$$u(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{u_1(t+\tau) - u_1(t-\tau)}{\tau} d\tau.$$

Покажем как функция  $u_1(t)$ , связанная с исходной  $u(t)$  преобразованиями Гильберта, может использоваться при экспертном анализе установившихся режимов в электрических цепях переменного тока.

Установившиеся режимы в электрических цепях в случае синусоидального питающего напряжения

Каждому установившемуся режиму электрической цепи соответствует строго определенное энергетическое состояние. Для электрической цепи в случае синусоидального питающего напряжения оно характеризуется значениями активной, реактивной и полной мощностей. Традиционно [28] эти значения вводятся через понятие о мгновенной мощности, равной произведению мгновенного напряжения на мгновенный ток. Математические преобразования этого произведения для цепей с реактивными нагрузками дают две составляющие: постоянную  $UI\cos(\varphi)$  и переменную  $UI\cos(2\omega t - \varphi)$ . Постоянную составляющую мгновенной мощности связывают с активной мощностью, которую находят как работу, совершаемую за один период:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt.$$

Переменную составляющую связывают с полной и реактивной мощностями. Полной мощностью называют амплитуду переменной составляющей  $UI$ . То, что переменная составляющая в некоторые интервалы времени принимает отрицательные значения, связывают с энергией обмена между источником и приемником. Количественно обмен оценивают реактивной мощностью как  $Q = UI\sin(\varphi)$ .

Использование функции, сопряженной напряжению  $u(t)$  по Гильберту, позволяет находить реактивную мощность аналогично активной [29]:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T H\{u(t)\} \cdot i(t) dt,$$

где  $H\{u(t)\}$  – преобразование Гильберта для приложенного напряжения  $u(t)$ . В случае если напряжение  $u(t)$  гармоническое, преобразование Гильберта для  $u(t) = \cos(\omega t)$  дает орту  $H\{u(t)\} = \sin(\omega t)$ ; для  $u(t) = \sin(\omega t)$  дает орту  $H\{u(t)\} = -\cos(\omega t)$ .

В качестве иллюстрации предложенного подхода рассмотрим электрическую цепь с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями.

Под действием напряжения

$$u(t) = U_m \sin(\omega t)$$

источника питания в цепи, содержащей активный индуктивный и емкостной элементы (рис. 1), возникает ток  $i$ . Ток создает падения напряжений на элементах цепи:

– на элементе с активным сопротивлением:

$$u_R(t) = i(t) \cdot R;$$

– на элементе с индуктивностью:

$$u_L(t) = -e_L(t) = L \frac{di(t)}{dt};$$

– на элементе с емкостью:

$$u_C(t) = \frac{q_C(t)}{C} = \frac{1}{C} \int i(t) dt.$$

Согласно второму закону Кирхгофа для данной цепи можно записать:

$$u(t) = u_R(t) + u_L(t) + u_C(t)$$

или

$$U_m \sin(\omega t) = i(t) \cdot R + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt.$$

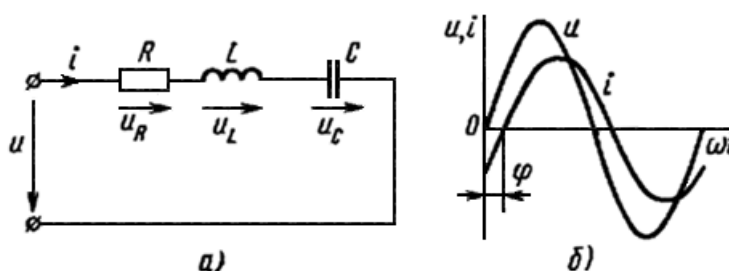


Рис. 1. Пример электрической цепи с активным, индуктивным и емкостным элементами:  
а) электрическая схема; б) изменение мгновенных значений напряжения и тока

Частным решением этого уравнения для установившегося режима будет:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

или

$$i(t) = I_m \cos(\varphi) \sin(\omega t) - I_m \sin(\varphi) \cos(\omega t),$$

где  $I_m = U_m/Z$ ;

– полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2};$$

– угол сдвига фаз между током в цепи и питающим цепь напряжением:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}.$$

Значение угла  $\varphi$  зависит от соотношения между реактивным  $X$  и активным  $R$  сопротивлениями. Чем больше реактивное сопротивление, тем больше угол  $\varphi$ . Знак угла  $\varphi$  зависит от соотношения между индуктивным и емкостным сопротивлениями. Если  $X_L$  больше  $X_C$ , то угол  $\varphi$  положительный, и ток отстает по фазе от напряжения на угол  $\varphi$ . Если  $X_L$  меньше  $X_C$ , то угол  $\varphi$  отрицательный, и ток опережает по фазе напряжение на угол  $\varphi$ .

На рис. 1 б показано, как изменяются напряжение и ток в цепи, представленной на рис. 1 а, при условии  $X_L > X_C$ .

Активная мощность, потребляемая электрической цепью, будет равна

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin(\omega t) \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) dt = \frac{U_m \cdot I_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} \cos(\varphi) = U \cdot I \cos(\varphi),$$

а реактивная мощность

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T H\{u(t)\} \cdot i(t) dt = -\frac{1}{T} \int_0^T U_m \cos(\omega t) \cdot I_m \cos(\omega t - \varphi) dt = \frac{U_m \cdot I_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} \sin(\varphi) = U \cdot I \sin(\varphi).$$

Полная, активная и реактивная мощности здесь также связаны между собой следующим образом:

$$P^2 + Q^2 = (U \cdot I)^2 (\cos^2(\varphi) + \sin^2(\varphi)) = (U \cdot I)^2 = S^2.$$

Другими словами:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Таким образом, получены результаты, полностью совпадающие с результатами традиционного подхода.

Аналогично проводят анализ электрических цепей с другим числом элементов и другим видом их соединений.

Установившиеся режимы в электрических цепях с изменяющимся во времени (параметрическим) сопротивлением

Энергетическое состояние электрической цепи в случае несинусоидального питающего напряжения и/или тока традиционно [28] характеризуется значениями активной и полной мощностей. Под активной мощностью несинусоидального тока понимают среднее значение мгновенной мощности за период первой гармоники:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt.$$

Полная мощность равна произведению действующего значения несинусоидального напряжения на действующее значение несинусоидального тока. Никакие другие понятия, характеризующие энергетические процессы при несинусоидальных режимах, не упоминаются.

Отличительной особенностью предлагаемого подхода является то, что и в цепях с режимами такого рода он позволяет вычислить реактивную мощность.

Рассмотрим цепь, состоящую из активного сопротивления и идеального ключа (рис. 2 а), симметрично замыкающегося в течение каждого полупериода частоты сети в некоторый момент времени  $(n\pi + \alpha)/\omega$  и размыкающегося в моменты  $\pi(n+1)/\omega$  (рис. 2 б), где  $n = 0, 1, 2, \dots$ .

Напряжение и ток в такой цепи будут описываться на периоде следующим образом:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t);$$

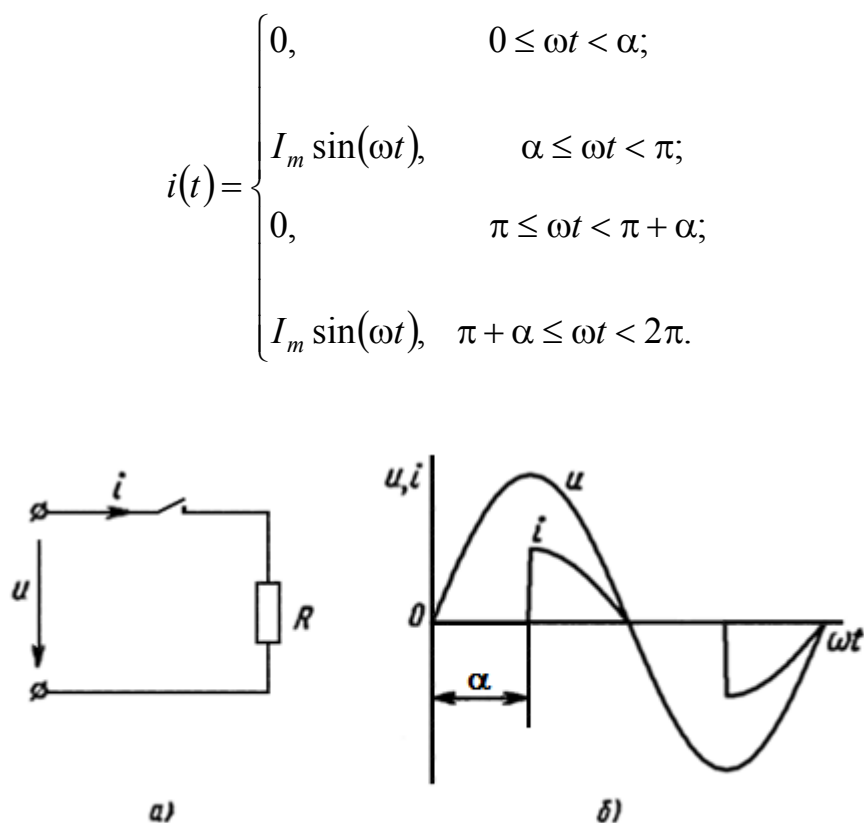


Рис. 2. Электрическая цепь, состоящая из активного сопротивления и идеального ключа:  
а) электрическая схема; б) изменение мгновенных значений напряжения, тока  
и мгновенной мощности для  $\alpha = \pi/2$

Представим ток  $i(t)$  в виде ряда Фурье:

$$\begin{aligned} i(t) = & I_m \sin(\omega t) - \frac{\alpha}{\pi} I_m \sin(\omega t) + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} I_m \sin(\omega t) + \\ & + \frac{\sin 4\alpha}{4\pi} I_m \sin(3\omega t) - \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} I_m \sin(3\omega t) + \\ & + \frac{\sin 6\alpha}{6\pi} I_m \sin(5\omega t) - \frac{\sin 4\alpha}{4\pi} I_m \sin(5\omega t) + \\ & + \frac{\sin 8\alpha}{8\pi} I_m \sin(7\omega t) - \frac{\sin 6\alpha}{6\pi} I_m \sin(7\omega t) + \dots - \\ & - \frac{\sin^2 \alpha}{\pi} I_m \cos(\omega t) + \\ & + \frac{1}{4\pi} I_m \cos(3\omega t) + \frac{\cos 4\alpha}{4\pi} I_m \cos(3\omega t) - \frac{\cos 2\alpha}{2\pi} I_m \cos(3\omega t) + \\ & + \frac{1}{12\pi} I_m \cos(5\omega t) + \frac{\cos 6\alpha}{6\pi} I_m \cos(5\omega t) - \frac{\cos 4\alpha}{4\pi} I_m \cos(5\omega t) + \\ & + \frac{1}{24\pi} I_m \cos(7\omega t) + \frac{\cos 8\alpha}{8\pi} I_m \cos(7\omega t) - \frac{\cos 6\alpha}{6\pi} I_m \cos(7\omega t) + \dots \end{aligned}$$

Как видно из результата разложения в токе  $i(t)$  можно выделить три его составляющие:

– активную составляющую  $i_a(t)$  коллинеарную напряжению  $u(t)$ :

$$i_a(t) = I_m \sin(\omega t) - \frac{\alpha}{\pi} I_m \sin(\omega t) + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} I_m \sin(\omega t) = \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right) I_m \sin(\omega t);$$

– реактивную составляющую  $i_p(t)$  коллинеарную напряжению  $H\{u(t)\} = -U_m \cos(\omega t)$  сопряженному с напряжением  $u(t)$  по Гильберту:

$$i_p(t) = -\frac{\sin^2 \alpha}{\pi} I_m \cos(\omega t);$$

– искажающую составляющую  $i_u(t)$  ортогональную как напряжению  $u(t)$ , так и напряжению  $H\{u(t)\}$ :

$$\begin{aligned} i_u(t) = & \frac{\sin 4\alpha}{4\pi} I_m \sin(3\omega t) - \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} I_m \sin(3\omega t) + \\ & + \frac{\sin 6\alpha}{6\pi} I_m \sin(5\omega t) - \frac{\sin 4\alpha}{4\pi} I_m \sin(5\omega t) + \\ & + \frac{\sin 8\alpha}{8\pi} I_m \sin(7\omega t) - \frac{\sin 6\alpha}{6\pi} I_m \sin(7\omega t) + \dots + \\ & + \frac{1}{4\pi} I_m \cos(3\omega t) + \frac{\cos 4\alpha}{4\pi} I_m \cos(3\omega t) - \frac{\cos 2\alpha}{2\pi} I_m \cos(3\omega t) + \\ & + \frac{1}{12\pi} I_m \cos(5\omega t) + \frac{\cos 6\alpha}{6\pi} I_m \cos(5\omega t) - \frac{\cos 4\alpha}{4\pi} I_m \cos(5\omega t) + \\ & + \frac{1}{24\pi} I_m \cos(7\omega t) + \frac{\cos 8\alpha}{8\pi} I_m \cos(7\omega t) - \frac{\cos 6\alpha}{6\pi} I_m \cos(7\omega t) + \dots \end{aligned}$$

Активная мощность, потребляемая электрической цепью, будет равна

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i_a(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin(\omega t) \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right) I_m \sin(\omega t) dt = \\ &= \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right) \frac{U_m \cdot I_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} = \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right) U \cdot I, \end{aligned}$$

а реактивная мощность

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{T} \int_0^T H\{u(t)\} \cdot i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \cos(\omega t) \cdot \frac{\sin^2 \alpha}{\pi} I_m \cos(\omega t) dt = \\ &= \frac{\sin^2 \alpha}{\pi} \cdot \frac{U_m \cdot I_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} = \frac{\sin^2 \alpha}{\pi} U \cdot I. \end{aligned}$$

Отметим, что в рассматриваемой электрической цепи нет элементов, способных накапливать энергию и возвращать её обратно источнику питания. Таким образом, загрузка источника реактивной составляющей мощности необязательно должна сопровождаться циркуляцией «обменной» энергии между нагрузкой и источником. Для ее возникновения достаточно создания пульсирующего одностороннего потока энергии, поскольку пульсирующий поток может всегда быть интерпретирован как результат сложения двух или более потоков, один из которых односторонний, а другие двусторонние [30].

Из последних двух выражений также видно, что при значении  $\alpha$ , равном нулю, полная мощность равна активной мощности, а при любых других значениях  $\alpha$  – всегда меньше корня квадратного из суммы квадратов активной и реактивной мощностей. Это объясняется тем, что часть полной мощности – мощность искажения  $D$  затрачивается на искажающую составляющую  $i_u(t)$  тока.

Поскольку искажающая составляющая  $i_u(t)$  тока ортогональна напряжению  $u(t)$  и напряжению  $H\{u(t)\}$ , сопряженному с напряжением  $u(t)$  по Гильберту, мощность искажения  $D$  можно характеризовать только действующим значением. Для синусоидального напряжения  $u(t)$

$$D = \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T \sum_{\substack{n=0 \\ n \neq 1}}^{\infty} (u(t) \cdot i_n(t))^2 dt}.$$

Погрешность вычисления мощности искажения определяется количеством членов ряда Фурье, используемых при вычислении.

Мощность искажения измеряют в вольт-амперах искажения (ВАи) [31].

Установившиеся режимы в электрических цепях в случае несинусоидального питающего напряжения

В случае несинусоидального питающего напряжения, представляющего интерес для питающих систем ограниченной мощности, в частности судовых, реактивная мощность на одних гармониках может потребляться, а на других – генерироваться. В этом случае ее можно характеризовать еще и действующим значением [32].

$$Q_d = \sqrt{\sum_{n>0}^{n=\infty} Q_n^2},$$

где  $Q_n$  – реактивная мощность гармоник напряжения и тока с номером  $n$ . Отметим, что если функция, описывающая несинусоидальное питающее напряжение, состоит из суммы гармонических составляющих:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{n=\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t),$$

то при вычислении реактивной мощности преобразование по Гильберту может быть осуществлено по [26]:

$$f_1(t) = H\{f(t)\} = \sum_{n=0}^{n=\infty} n\omega \int_0^t f_n(\tau) d\tau.$$



В результате:

$$f_1(t) = \sum_{n=1}^{n=\infty} (a_n \sin n\omega t - b_n \cos n\omega t).$$

При несинусоидальном питающем напряжении активная мощность находится как [32]

$$P = \sum_{n=0}^{n=\infty} P_n,$$

а мощность искажения [32]

$$D = \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq n}}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (u_m(t)i_n(t) - i_m(t)u_n(t))^2 dt}.$$

При несинусоидальном напряжении и токе полная, активная, действующая реактивная и мощность искажения связаны между собой следующим соотношением [32]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_d^2 + D^2}.$$

Отметим, что знание полной мощности необходимо для реализации и экспертизы надлежащих генерации и распределения электроэнергии. Знание значений активной и реактивной мощностей необходимо для осуществления взаимных расчетов между поставщиком и потребителем электроэнергии [33]. Знание значения реактивной мощности необходимо также при разработке и экспертизе ее компенсаторов. Знание мощности искажения необходимо при разработке и экспертизе фильтров гармоник тока [34].

### Заключение

1. В данной статье изложен подход к анализу установившихся режимов электрических цепей, использующий понятие комплексного аналитического напряжения.
2. Предложенный подход обладает рядом важных преимуществ над другими аналитическими методами, поскольку позволяет избежать неоднозначности оценки установившихся режимов электрической цепи с несинусоидальными токами и напряжениями.
3. Для оценки обоснованности и достоверности результатов разработанного подхода приведены иллюстративные примеры, показывающие тесную связь между традиционным и предлагаемым подходами.
4. Анализ результатов расчетов показывает приемлемость предлагаемого подхода, который может быть рекомендован при расчете и экспертизе установившихся режимов электрических цепей с несинусоидальными токами и напряжениями.

### Список источников

1. Budeanu C.I. Probleme de la Presence des Puissance Reactives dans les Installations de Production et de Distribution d'Energie Electrique // CIGRE. SESSION. 1929. T. 3. P. 155.
2. Emde F. Entohmung. ETZ. 1930. H. 15. S. 533–535.
3. Fryze S. Wirk, Blind-und Scheinleistung in Electriscen mit Nichtsinus Formigen Verlauf von Strom und Spannung // Electrotechnische Zeitschrift. 1932. № 25. S. 596–599.

4. Чернышев М.А. Закон первичных токов многофазных мутаторов // Электричество. 1940. № 6. С. 53–55.
5. Пухов Г.Е. Теория мощности системы периодических много-фазных токов // Электричество. 1953. № 2. С. 56–61.
6. Жемеров Г.Г. Влияние преобразователей частоты с непосредственной связью на питающую сеть // Электричество. 1968. № 4. С. 24–30.
7. Крogerис А.Ф., Трейманис Э.П. Характерные показатели для оценки качества электрической энергии у преобразователей // Изв. АН Латв. ССР: Сер. физ.-техн. науки. 1968. № 5. С. 102–110.
8. Поссе А.В. Баланс мощностей в цепях, содержащих вентильные преобразователи, источники ЭДС и индуктивности // Труды НИИПТ. 1973. Вып. 19. С. 3–27.
9. Sharon D. Reactive Power Definition and Power Factor Improvement in Nonlinear System // Proc. IEEE. 1973. Vol. 20. № 8. P. 704–706.
10. Emanuel A.E. Energetical Factors in Power Systems with Nonlinear Loads // Archiv fur Electro Technik. 1977. B. 59. P. 183–189.
11. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. М.: Энергия. 1978. 320 с.
12. Page C.U. Reactive power in nonsinusoidal situations // IEEE Trans. on Instr. and Measurement. 1980. Vol. 29. № 4. P. 420–423.
13. Савиновский Ю.А., Королев С.Я., Стратонов А.В. К интегральному понятию «реактивная мощность» // Изв. Высш. учеб. заведений. Энергетика. 1981. № 7. С. 55–57.
14. Дрехслер Р. Коэффициент мощности и потери в сети при несимметричном и нелинейном потребителе // Электричество. 1982. № 2. С. 20–24.
15. Жарков Ф.П. Об одном способе определения реактивной мощности // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1984. № 2. С. 73–81.
16. H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae. Instantaneous reactive power compensators comprising switching device without energy storage components // IEEE Trans. Industry Applications. 1984. Vol. IA-20. № 3. P. 625–630.
17. Чеботарев В.А. О компенсации реактивной мощности на Стахановском заводе ферросплавов // Промышленная энергетика. 1987. № 2. С. 51–52.
18. Кадомский Д.Е. Активная и реактивная мощности – характеристики средних значений работы и энергии периодического электромагнитного поля в элементах нелинейных цепей // Электричество. 1987. № 7. С. 39–43.
19. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Обмен электромагнитной энергией в нелинейной среде // Изв. высш. учеб. заведений. Энергетика. 1988. 399 с.
20. Демирчян К.С. Реактивная мощность на случай несинусоидальных функций. Ортомощность // Изв. РАН. Энергетика. 1992. № 1. С. 15–38.
21. Makram E.B., Haines R.B., Girgis A.A. Effect of Harmonic Distortion in Reactive Power Measurement // IEEE Trans. Industry Applications. 1992. Vol. IA-28. № 4. P. 782–787.
22. Лабунцов В.А., Чжан Дайжун. Однофазные полупроводниковые компенсаторы пассивной составляющей мгновенной мощности // Электричество. 1993. № 12. С. 20–32.
23. Беркович Е.И. Реактивная мощность как информационное понятие // Электричество. 1996. № 2. С. 51–58.
24. Фархадзаде Э.М., Гулиев Г.Б. Расчет показателей несинусоидального режима узла нагрузки // Электричество. 2002. № 8. С. 20–25.
25. Зиновьев Г.С. Обобщение прямых методов расчета действующих значений тока в цепях с несинусоидальным напряжением // Электричество. 2019. № 2. С. 40–47.
26. Агунов М.В. Энергетические процессы в электрических цепях с несинусоидальными режимами и их эффективность. Кишинев-Тольятти: МолдНИИТЭИ. 1997. 84 с.
27. Вакман Д.Е., Седлецкий Р.М. Вопросы синтеза радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио. 1965. 256 с.

28. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1973. 752 с.
29. Агунов М.В. Представление составляющих электрического сопротивления для моделей нелинейных нагрузок // Электричество. 2004. № 4. С. 48–50.
30. Агунов М.В., Агунов А.В. Об энергетических соотношениях в электрических цепях с несинусоидальными режимами // Электричество. 2005. № 4. С. 53–56.
31. Энергетические характеристики системы источник питания – сварочная дуга / А.В. Агунов [и др.] // Сварочное производство. 2002. № 7. С. 13–17.
32. Agunov M.V., Agunov A.V., Globenco I.G. Energy Balance in Electric Circuits with Non-Sinusoidal Voltage and Current // IEEE Trans. on Power Systems. 1997. Vol. 12. №. 4. P. 1507–1510.
33. Агунов М.В., Агунов А.В., Вербова Н.М. Новый подход к измерению электрической мощности // Промышленная энергетика. 2004. № 2. С. 30–33.
34. Вербова Н.М., Агунов М.В. Силовое активное фильтро-компенсирующее устройство с системой управления по отклонению // Судостроение. 2020. № 1. С. 16–18.

**Информация о статье:** статья поступила в редакцию: 20.04.2025; принята к публикации: 22.05.2025

Информация об авторах:

**Агунов Михаил Викторович**, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: [mag@igps.ru](mailto:mag@igps.ru), доктор технических наук, профессор, лауреат ВВЦ

**Вербова Наталья Михайловна**, доцент высшей школы автоматизации и робототехники, доцент высшей школы искусств. интеллекта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29), e-mail: [verbova\\_nm@spbstu.ru](mailto:verbova_nm@spbstu.ru), кандидат технических наук, доцент, лауреат премии РАН, SPIN-код: 4610-9978