

**УДК 621.316****ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

**Воронин Вячеслав Андреевич,**  
аспирант, e-mail: seno670@gmail.com

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

**Аннотация:**

*Имея данные по ущербу от низкого качества электроэнергии и по эффективности затрат на его повышение, можно получить оптимальное для конкретного потребителя значение показателей качества электроэнергии, при котором затраты потребителя примут минимальное значение. Разработка таких значений является оптимизационной задачей.*

*В статье сформулирована оптимизационная задача, раскрыта актуальность и значимость данной проблемы. Представлены результаты обзора литературы на данную тему. Рассмотрены основные положения оптимизации показателей качества электрической энергии. Представлена целевая функция, выполнен ее анализ и определены ее основные свойства, сформулирован объект и критерий оптимизации. Описаны ограничения, налагаемые на параметры оптимизации. Приведена структурная модель оптимизации показателей качества электроэнергии, дано описание ее основных блоков.*

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, электромагнитная совместимость, оптимизация

Развитие электроэнергетики связано с совершенствованием существующей и внедрением новых, передовых технологий. Этому процессу сопутствует широкое внедрение мощных нелинейных, несимметричных и резкопеременных электро приемников, а также различных систем управления технологическими процессами, систем защиты и автоматики, чувствительных к электромагнитным помехам (ЭМП). Со временем данная тенденция только набирает обороты, делая проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) и качества электроэнергии (КЭ) все более актуальными и значимыми.

ЭМП приводят к возникновению дополнительных потерь мощности в элементах электрической сети, снижению энергоэффективности электрооборудования, ускорению износа его изоляции, сбоям, нарушениям технологического процесса, что может повлечь недоотпуск и брак продукции или даже выход из строя самого электрооборудования. Не стоит и говорить о том, что все это приводит к финансовому ущербу для предприятия. Данный ущерб можно сократить, повысив надежность электроснабжения и уровень КЭ, специальными техническими средствами или организационными мероприятиями. Однако это также потребует финансовых вложений. В итоге имеются две взаимозависимые составляющие затрат: затраты на покрытие ущерба от низкого КЭ и на мероприятие по его улучшению. Задача оптимизации КЭ заключается в нахождении такого уровня показателей КЭ (ПКЭ), при котором будет достигнуто оптимальное соотношение между данными затратами.

Интерес к данной проблеме возник еще в 70-х годах прошлого века. Анализ литературы показал,

что первые упоминания об оптимизации ПКЭ появляются уже в 1974 году. Так, в работе [8,13] ставится задача оптимизации ПКЭ и уже в [9,10,14] предпринимается попытка разработки математической модели для решения этой задачи. Однако к концу 80-х годов интерес к данной теме утихает. Исследования, предпринятые в этот период, показали, что оптимальные уровни ПКЭ примерно совпадают с допустимыми нормами стандарта КЭ и в пределах допустимого диапазона значений ПКЭ экономичность работы электро приемников изменяется незначительно. К настоящему времени, в связи выходом нового стандарта КЭ, нормы которого значительно отличаются от стандарта ГОСТ 13109-67, относительно которого были сделаны вышеупомянутые выводы, а также изменением состава электроприемников предприятий и средств улучшения КЭ, данные выводы утратили свою актуальность.

Постановка оптимизационной задачи заключается в определении объекта, параметров и критериев оптимизации, а также ограничений для целевой функции. Объектом оптимизации являются четыре ПКЭ: отклонения напряжения, коэффициенты несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности, коэффициент гармонических составляющих. Оптимизируемые ПКЭ могут быть представлены в виде вектора:

$$\bar{U} = \begin{vmatrix} \delta U \\ K_{2U} \\ K_{0U} \\ K_{(v)} \end{vmatrix} \quad (1)$$

Критерием оптимизации является наиболее экономичный режим работы рассматриваемого

объекта. Наилучшим образом данный критерий выражается через функцию приведенных затрат:

$$\mathcal{Z}(\bar{\Pi}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $\mathcal{Z}(\bar{\Pi})$  – приведенные затраты.

$$\mathcal{Z}(\bar{\Pi}) = K_u K(\bar{\Pi}) + Y(\bar{\Pi}), \quad (3)$$

где  $K(\bar{\Pi})$  – единовременные капитальные вложения на мероприятие по улучшению КЭ;  $K_u$  – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений;  $Y(\bar{\Pi})$  – ущерб от низкого КЭ. Графически целевая функция представлена на рис. 1.

На целевую функцию накладываются ограничения, обусловленные техническими требованиями к электрическим сетям, электроприемникам и средствам управления КЭ. В качестве таких ограничений могут использоваться допустимое значение температуры изоляции, кратность снижения срока службы электроприемника и дополнительные потери мощности [3]. Предельно допустимые значения ПКЭ стандартов КЭ являются обобщенными и не учитывают особенностей отдельных типов электроприемников, что в ряде случаев приводит к необоснованной жесткости данной норм. Так, в работах [4-7] отмечается, что ряд электроприемников может нормально функционировать и при превышении допустимых значений ПКЭ.

Прежде чем приступить к детальной разработке оптимизационной модели, целесообразно выявить основные свойства целевой функции.

Для ряда отраслей промышленности задача улучшения КЭ является многопараметрической. Как отмечается в [11], в электросталеплавильных цехах, цехах машиностроительных заводов оптимизируемыми параметрами являются все ПКЭ (кроме отклонений частоты). Это связано с взаимным влиянием между ними, т.е. величина одного показателя зависит от изменения другого. Так, несимметрия и колебания напряжения оказывают влияние на величину отклонений напряжения прямой последовательности, а отклонения напряжения, в свою очередь, влияют на уровень несинусоидальности в сети с вентильными преобразователями [9]. Вопрос взаимного влияния ПКЭ в настоящее время еще мало изучен и нормирование ПКЭ осуществляется без учета данного фактора [2]. Еще одним доводом в пользу необходимости рассмотрения всей совокупности ПКЭ является многофункциональность технических средств управления КЭ. Их экономической эффективности может быть дана адекватная оценка только при учете всех нормализуемых ПКЭ. Так, фильтро-компенсирующие устройства выполняют функцию ограничения уровня гармоник и компенсации реактивной мощности и, следовательно, влияют не только на уровень несинусоидальности напряжения, но и на величину отклонений напряжения и потери мощности в сети. Все это обуславливает важное свойство целевой функции – несепарабельность, т.е. невозможность разделения влияния аргументов (ПКЭ) на общий результат.

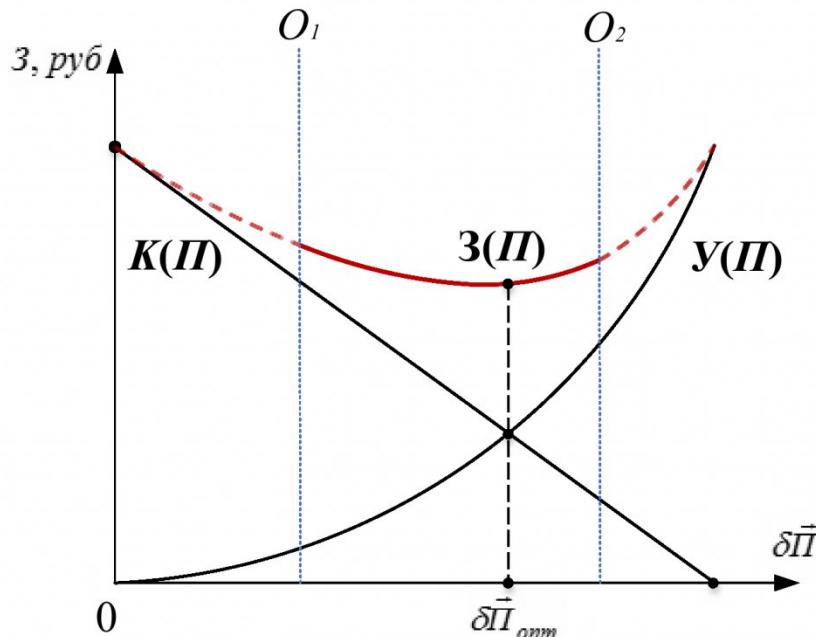


Рис. 1. Принципиальный характер изменения составляющих затрат при управлении КЭ.  $Z$  – суммарные затраты;  $\delta\bar{\Pi}$  – отклонения ПКЭ;  $\delta\bar{\Pi}_{optm}$  – оптимальный уровень отклонений ПКЭ;  $O_1$  – технические ограничения КЭ;  $O_2$  – технически допустимый уровень ЭМП.

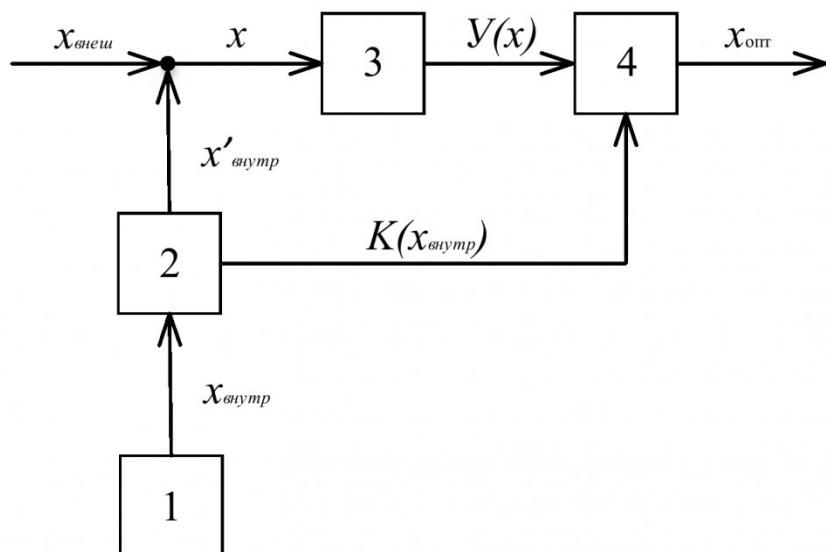


Рис. 2. Структурная схема модели оптимизации ПКЭ

Еще одним свойством целевой функции (3) является нелинейность. Значения аргументов входят в функцию во второй степени. Из этого следует, что для решения оптимизационной задачи должны использоваться методы нелинейного программирования.

Структурная схема модели оптимизации ПКЭ представлена на рис. 2. В модели можно выделить четыре блока. Блок №1 – моделирование эмиссии ЭМП искажающими электроприемниками, выходным параметром блока являются характеристики ЭМП  $x_{внутр}$ , поступающие на вход блока №2. Блок №2 осуществляет расчет распространения ЭМП в сети и взаимодействия со средствами управления КЭ. Выходными параметрами блока является величина остаточного уровня ЭМП  $x'_{внутр}$  и затраты на мероприятие по улучшению КЭ  $K(x_{внутр})$ . На вход блока №3 поступают характеристики ЭМП  $x$ , обусловленные совокупным действием внешних и внутренних источников помех, а также средств управления КЭ. Блок №3 осуществляет расчет реакции электроприемника на ЭМП. Реакция электроприемника может быть выражена значениями дополнительных потерь мощности, кратностью снижения срока службы, величиной брака и недоотпуска продукции и т.д. Дан-

ные реакции должны быть преобразованы в экономический эквивалент – величину ущерба  $Y(x)$ . В блоке №4 происходит обработка данных об ущербе от низкого КЭ и затратах на его улучшение. На основании данной обработки определяются оптимальные значения ПКЭ  $x_{опт}$ .

Выбор метода оптимизации в основном определяется видом математической модели, требуемой степенью точности полученных результатов, располагаемыми вычислительными ресурсами. Как было отмечено ранее, для решения оптимизационной задачи должны использоваться методы нелинейного программирования. В зависимости от исходных условий постановка задачи может быть детерминистической или стохастической. К наиболее распространенным методам оптимизации относятся метод неопределенных множителей Лагранжа, различные модификации градиентного метода, метод Ньютона и т.д. [12].

**Вывод.** В работе кратко рассмотрены основные теоретические положения оптимизации ПКЭ. Следующим этапом является более детальная проработка математической модели, рассмотрение каждого блока рис. 2 в отдельности и выбор наиболее подходящего метода оптимизации для различных исходных данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.
- Жежеленко, И.В. / Электромагнитная совместимость потребителей: моногр. / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
- Кузнецов, В.Г. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения / В.Г. Кузнецов, Э. Г. Куренный, А.П. Лютий. – Донецк: «Донбасс», 2005. – 249 с.
- Вагин, Г.Я. О необходимости приведения норм ГОСТ 13109-97 к требованиям международных стандартов / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов // Промышленная энергетика – 2004 – №9. – С. 45-49.
- Вагин, Г.Я. Комментарии к новому ГОСТ Р 54149-2010 и сопровождающим его стандартам // Промышленная энергетика – 2013 – №1. – С. 39-43.

6. Вагин, Г.Я. О необходимости приведения нормативных документов по электромагнитной совместимости к требованиям международных стандартов / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов // Промышленная энергетика – 2010 – №11. – С. 45-48.
7. Вагин, Г.Я. Электромагнитные помехи и электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий // Промышленная энергетика – 1994. – №7. – С. 37-40.
8. Веников, В.А. Народнохозяйственное значение повышения качества электроэнергии / В.А. Веников, М.С. Либкинд, Б.А. Константинов // Электричество – 1974. – №11. – С. 1-4.
9. Константинов, Б.А. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость электрооборудования предприятий / Б.А. Константинов, И.В. Жежеленко, А.М. Липский и др. // Электричество – 1977. – №3. – С. 1-8.
10. Багиев, Г.Л. Основы экономики и управления качеством энергии / под. ред. Б.А. Константинов. - Л., Изд-в Ленингр. ун-та, 1979. – 120 с.
11. Жежеленко, И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, М.Л. Рабинович, В.М. Божко. – К.: Техніка, 1981. – 160 с.
12. Непша, Ф.С. Обоснование применения генетических алгоритмов в оптимальном управлении режимами распределительных электрических сетей // Инновационная наука и современное общество: сб. ст. межд. науч.-практ. конф. 21-22 августа 2013 г. Часть 1. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2013. – С. 97-99.
13. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в электрических сетях / И.В. Жежеленко, В.М. Сорокин // Электричество – 1974. – №11. – С. 23-28.
14. Жежеленко, И.В. Нормирование уровней гармоник с учетом экономического ущерба // Электричество – 1976. – №5. – С. 64-68.

*Поступило в редакцию 14.04.2015*

## ON THE OPTIMIZATION OF POWER QUALITY INDICES

Voronin Vyacheslav A.,  
graduate student, e-mail: [seno670@gmail.com](mailto:seno670@gmail.com)

<sup>1</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

### **Abstracts:**

*Information about damage caused by low power quality and cost of its improvement enable us to obtain optimal power quality indices for a particular consumer. At optimal indices, the consumer incurs minimal financial damage. Development optimal power quality indices is optimization problem.*

*In this paper were formulated optimization problem, revealed the urgency and importance of this theme. The results of a literature review on this topic are presented. Main theoretical basis of power quality optimization are considered. The objective function, its analysis and main feature are presented. Object and optimization criterion are formulated. The technical limitations of objective function are described. Schematic diagram of optimization model of power quality indices and its description are presented.*

**Key words:** power quality, electromagnetic compatibility, optimization

### REFERENCES:

1. GOST 32144-2013 Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2014.
2. Zhezhelenko, I.V. Elektromagnitnaya sovmestimost' potrebitelye: monogr [Electromagnetic compatibility of consumer]. Moscow, Mashinostroenie, 2012. 351 P.
3. Kuznetsov, V.G. Elektromagnitnaya sovmestimost'. Nesimmetriya i nesinusoidal'nost' napryazheniya [Electromagnetic compatibility. Voltage unbalance and nonsinusoidality]. Donetsk, Donbass, 2005. 249 P.
4. Vagin, G.Ya. O neobkhodimosti privedeniya norm GOST 13109-97 k trebovaniyam mezhdunarodnykh standartov [On the necessity of adjusting indices of GOST 13109-97 in accordance with the requirements of international standards]. Promyshlennaya energetika [Industrial power engineering]. 2004. No. 9. P. 45-49.
5. Vagin, G.Ya. Kommentarii k novomu GOST R 54149-2010 i soprovozhdayushchim ego standartam

[Comment on the new standard for the quality of electric power GOST R 54149–2010 and attributed standards]. Promyshlennaya energetika [Industrial power engineering]. 2013. No. 1. P. 39-43.

6. Vagin, G.Ya. O neobkhodimosti pivedeniya normativnykh dokumentov po elektromagnitnoy sovmestnosti k trebovaniyam mezhdunarodnykh standartov [On the necessity of adjusting the regulations on electromagnetic compatibility and the quality of electricity in accordance with the requirements of international standards]. Promyshlennaya energetika energetika [Industrial power engineering]. 2010. No. 11. P. 45-48.

7. Vagin, G.Ya. Elektromagnitnye pomekhi i elektromagnitnaya sovmestnost' elektropriemnikov promyshlennykh predpriyatiy [Electromagnetic interference and electromagnetic compatibility of industrial electric equipment]. Promyshlennaya energetika [Industrial power engineering]. 1994. No. 7. P. 37-40.

8. Venikov, V.A. Narodnokhozyaystvennoe znachenie povysheniya kachestva elektroenergii [National economic importance of improvement of power quality]. Elektrichestvo [Electricity]. 1974. No. 11. P. 1-4.

9. Konstantinov, B.A. Kachestvo elektroenergii i elektromagnitnaya sovmestnost' elektrooborudovaniya predpriyatiy [Power quality and electromagnetic compatibility of industrial electric equipment]. Elektrichestvo [Electricity]. 1977. No. 3. P. 1-8.

10. Bagiev, G.L. Osnovy ekonomiki i upravleniya kachestvom energii [Basis of the economics and energy quality management]. Leningrad, Publishing of Leningrad State University. 1979. 120 P.

11. Zhezhelenko, I.V. Kachestvo elektroenergii na promyshlennykh predpriyatiyakh [Power quality on industrial enterprises]. Kiev. Tekhnika. 1981. 160 P.

12. Nepsha, F.S. Obosnovanie primeneniya geneticheskikh algoritmov v optimal'nom upravlenii rezhimami raspredelitel'nykh elektricheskikh setey [Substantiation of application of genetic algorithms in optimal control of power distribution networks modes]. Innovatsionnaya nauka i sovremennoe obshchestvo: sb. st. mezhd. nauch.-prakt. konf. 21-22 avgusta 2013 g. [Innovative science and modern society: proceedings of the international scientific conference (August, 21-22, 2013)]. Vol. 1. Ufa, Publishing of the Bashkir State University, 2013. P. 97-99.

13. Zhezhelenko, I.V. Vysshie garmoniki v elektricheskikh setyakh [Harmonics in electrical networks]. Elektrichestvo [Electricity]. 1974. No. 11. P. 23-28.

14. Zhezhelenko, I.V. Normirovanie urovney garmonik s uchetom ekonomiceskogo ushcherba [Rationing of harmonics rate with electromagnetic damage]. Elektrichestvo [Electricity]. 1976. No. 5. P. 64-68.

*Received 13.05.2015*