

УДК 621.313

Чёрный С.Г., Жиленков А.А., Титов И.Л., Железняк А.А.

Керченский государственный морской технологический университет. Украина, г. Керчь

## АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ СЛОЖНЫХ ПРОЦЕССОВ

*В статье определен обобщенный показатель качества электроэнергии в автономной электроэнергетической системе (ЭЭС), который является вводимым критерием оценки качества функционирования фильтро-компенсирующего устройства (ФКУ). В результате проведенного анализа установлено, что наилучший показатель при определении установленной мощности ФКУ, может достигнуто с применением в системе управления ФКУ элемента интеллектуальной поддержки принятия решений по регулированию параметров электроэнергии. Представлено и обосновано, что при этом удаётся достичь оптимального показателя качества при использовании полной установленной мощности ФКУ. Произведена формализация задачи оптимального управления ФКУ в автономной ЭЭС. Приведен алгоритм решения задачи оптимального управления ФКУ.*

*Ключевые слова:* принятие решений, критерий, оптимальное управление, мощность.

### Введение

Известно выражение полной мощности сети (1) состоящее из активной мощности  $P$ , реактивной мощности  $Q$  и мощности искажений  $T$ , описуемое составом высших гармоник.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2} \quad (1)$$

Строгое определение реактивной мощности (РМ)  $Q$  имеется только для случая, при котором токи и напряжения в цепях синусоидальны по форме. Понятие реактивной мощности при несинусоидальных режимах в течение многих лет является предметом научных дискуссий [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8]. Следует заметить, что значения реактивной мощности, определённые исходя из разных теорий, могут отличаться во много раз. Группой ученых [1, 3, 5, 9–15] сформировано мнение, что понятие реактивной мощности применимо только для синусоидальных режимов и его нельзя переносить на несинусоидальные.

Фундаментально РМ можно подразделить на четыре группы: спектральные формы, интегральные формы, использование векторных и функциональных пространств для определения РМ, энергопотокотворные теории. Значения РМ, найденные по разным методикам, могут отличаться во много раз. Это наглядно видно из примера сравнения трёх формул для РМ, предложенных разными авторами, который приведён Я. Ю. Солодухо в [6]:

$$Q = \sum_{l=1}^{\infty} Q_l; \quad Q = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{l} Q_l; \quad Q = \sum_{l=1}^{\infty} l Q_l,$$

где  $l$  – номер гармоники.

Исходя из различия формул, расчёты РМ, выполненные Я.Ю. Солодухо, показывают, что в общем случае не соблюдается также баланс реактивных мощностей. На основе анализа теорий РМ при несинусоидальных режимах в [5, 6] делается важный вывод о том, что для сетей с несинусоидальными режимами до сих пор не создана строгая общепринятая теория реактивной мощности. Основной причиной этого является отсутствие строгой методической основы для расширения понятия РМ на несинусоидальные режимы. Для несинусоидальных режимов реактивная мощность может или отсутствовать, или переходить. Поэтому многими авторами рекомендуется при практических расчётах под реактивной мощностью понимать реактивную мощность по основной гармонике. В настоящей работе будем следовать этим рекомендациям говорить о реактивной мощности по основной гармонике.

Необходимо ввести понятие обобщенного показателя качества электроэнергии в автономной электроэнергетической системе (ЭЭС). Рассмотрим известное выражение коэффициента мощности (2), которое учитывает показатели мощностей в виде произведения относительной мощности искажения  $\chi$  и показателя реактивной мощности по первой гармонике  $\cos\varphi$ .



$$X = \chi \cos \varphi \quad (2)$$

Так же напряжения и токи сети могут быть представлены суммами гармонических составляющих ряда Фурье:

$$u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sin(k\omega_0 t + \delta_k), \quad (3)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(k\omega_0 t + \theta_k). \quad (4)$$

Их действующие значения:

$$U_{rms}(t) = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_k^2}{2}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_{krms}^2}, \quad (5)$$

$$I_{rms}(t) = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_k^2}{2}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_{krms}^2}. \quad (6)$$

При определении уровня содержания гармоник в знакопеременных сигналах пользуются показателем суммарных гармонических искажений, равным:

$$PF = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi}{U_1 I_{rms}} = \frac{I_1 \cos \varphi}{I_{rms}}, \quad (7)$$

$$СГИ_I = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}{I_1^2}} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1}. \quad (8)$$

Как правило, в ходе натурных исследований измеряются такие параметры, как коэффициент мощности  $PF$ , равный отношению активной мощности к полной, угол сдвига фазы основной гармоники тока относительно основной гармоники напряжения, а также суммарные гармонические искажения тока и напряжения, выразим взаимосвязь между данными показателями.

Коэффициент мощности определяется выражением  $PF = \frac{P}{S}$ . Считая, что гармонические искажения напряжения в сети малы (что справедливо для сети бесконечной мощности), принимают, что действующее значение напряжения определяется значением основной гармоники, т.е.  $U_{rms} \approx U_1$ . В результате, коэффициент мощности представляют выражением:

$$СГИ_u = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}{U_1^2}} = \sqrt{\left(\frac{U_{rms}}{U_1}\right)^2 - 1}, \quad (9)$$

Если уровень СГИ напряжения превышает допустимый, то их необходимо учитывать и, в результате, обобщенный показатель качества электроэнергии может быть представлен выражением:

$$X = \chi \cos \varphi = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi}{U_{rms} I_{rms}}, \quad (10)$$

Из (7) и (8) имеем следующие зависимости:

$$\frac{U_1}{U_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{1 + СГИ_u^2}}, \quad (11)$$

$$\frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{1 + СГИ_i^2}}. \quad (12)$$

Тогда имеем:

$$\chi = \frac{1}{\sqrt{1 + СГИ_u^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + СГИ_i^2}}. \quad (13)$$

Предполагая, что существует алгоритм управления фильтро-компенсирующего устройства (ФКУ), при котором достигаются заданные параметры обобщенного показателя качества при наименьшей (или оптимальной) установленной мощности ФКУ, произведем формализацию задачи оптимального управления ФКУ следующим образом.

Введем вектор гармоник тока преобразователя в сети:

$$I = [i_1, \dots, i_i, \dots, i_N]^T, \quad (14)$$

где  $i_i$  –  $i$ -я гармоника тока;  $N$  – количество учитываемых гармоник.

Аналогично введем вектор гармоник напряжения:

$$U = [u_1, \dots, u_i, \dots, u_N]^T \quad (15)$$

Введем вектор неактивной мощности ФКУ:

$$X = [x_1, \dots, x_i, \dots, x_N]^T \quad (16)$$

Пусть полная установочная мощность ФКУ будет задана параметром  $S_{opt}$ , а текущая мощность, генерируемая ФКУ, выражается параметром  $S_x$ .

Вектора  $I$  и  $U$  – внешние параметры задачи управления, а  $S_{opt}$  – прямое ограничение. Тогда, обобщенный показатель качества  $X$  и мощность  $S_x$  – выходные параметры задачи оптимального управления.

Введем также вектора  $H$  – верхних и  $L$  – нижних границ вектора  $X$ , так что для  $i$ -го элемента векторов справедливо:

$$l_i \leq x_i \leq h_i. \quad (17)$$

Будем считать, что известны зависимости

$$X = f(X) \quad (18)$$

$$S_{\Sigma} = f_1(X) = \sum_{i=1}^N x_i \quad (19)$$

Требуется обеспечить максимизацию  $X$  и оптимизацию  $S_{\Sigma}$  при ограничениях:

$$X_{\min} \leq f(X) \leq X_{\max} \quad (20)$$

$$L \leq X \leq H \quad (21)$$

$$f_1(X) = S_{opt} \quad (20)$$

где  $X_{\min}, X_{\max}$  – соответственно, минимальное и максимальное значение обобщенного показателя качества.

То есть, (20) – функциональное ограничение на выходные параметры задачи управления, а выражение (22) – функциональное ограничение на внутренние управляемые параметры.

Физический смысл ограничения (22) состоит в том, что независимо от текущего распределения мощности ФКУ затрачиваемой на компенсацию уровня той или иной гармоники и реактивной мощности, текущая суммарная мощность  $S_{\Sigma}$  ФКУ должна оставаться равной установленной мощности  $S_{opt}$  ФКУ.

Система параметров, уравнений и неравенств (14) – (22) образует формальную математическую постановку задачи оптимального управления ФКУ.

Вектор  $X^*$ , удовлетворяющий условиям (20) – (22), называется оптимальной точкой, а соответствующие значения  $X^* = f(X^*)$  и  $S_{\Sigma}^* = f_1(X^*)$  – оптимальными значениями целевых функций.

Оптимальная точка  $X^*$ , оптимальное значение целевой функции  $X^*$  и оптимальное значение целевой функции  $S_{\Sigma}^* = f_1(X^*)$  образуют оптимальное решение задачи, которое может быть локальным и глобальным. Локальное решение представляет собой наименьшее значение целевой функции в ограниченной окрестности точки  $X$ , в то время как глобальное решение даёт наименьшее значение целевой функции.

Алгоритм решения задачи оптимального управления ФКУ показана на рис. 1. Операции алгоритма решения выполняются в следующей последовательности:

1) определяются внешние параметры; вводятся значения всех постоянных параметров и ограничений (блоки 1, 5, 6);

2) с учётом прямых ограничений вычисляется вектор  $X$  (блок 2). Здесь же производится вычисление значения целевой функции  $S_{\Sigma}$  и её оценка на оптимальность: если  $S_{\Sigma} \neq S_{opt}$ , то производится корректировка вычисления внутренних управляемых параметров;

3) вычисляется значение обобщенного показателя качества  $X$  и сравнивается с величинами функционального ограничения  $X_{\min}, X_{\max}$  (блок 3); если условия функционального ограничения на выходные параметры не соблюдаются, то производится корректировка вычисления внутренних управляемых параметров;

4) производится вывод координат выходного параметра  $X^*$  (блок 4).

Рассмотрим случай, когда в ходе управления работой ФКУ есть возможность принятия решений по выбору значений желаемых параметров качества. Примем, что желаемый  $\cos\phi$  в системе может варьироваться в пределах  $0,8 \div 0,9$ , а показатель  $\chi = 0,968 \div 0,99$ . Принятие решений будем осуществлять из условия поддержания постоянной номинальной загрузки ФКУ по полной мощности. Результаты моделирования приведены на рис. 2. Из графиков видно, что заданные показатели качества обеспечиваются при максимальной полной мощности ФКУ не более  $0,42 S_{\max}$  (мощность одного генератора ЭЭС), что является минимальным значением по сравнению с вариантом без системы принятия решений (см. рис. 3).

На рис. 4 приведены значения показателей качества, полученные в результате принятия решений в зависимости от мощности потребляемой нелинейной нагрузкой ЭЭС. Заметим, что изменение режимов ФКУ в представленных примерах осуществляется только в 5 точках  $N$ . Непрерывное регулирование по всему диапазону  $N$  позволит улучшить качество регулирования обобщенного показателя электроэнергии.

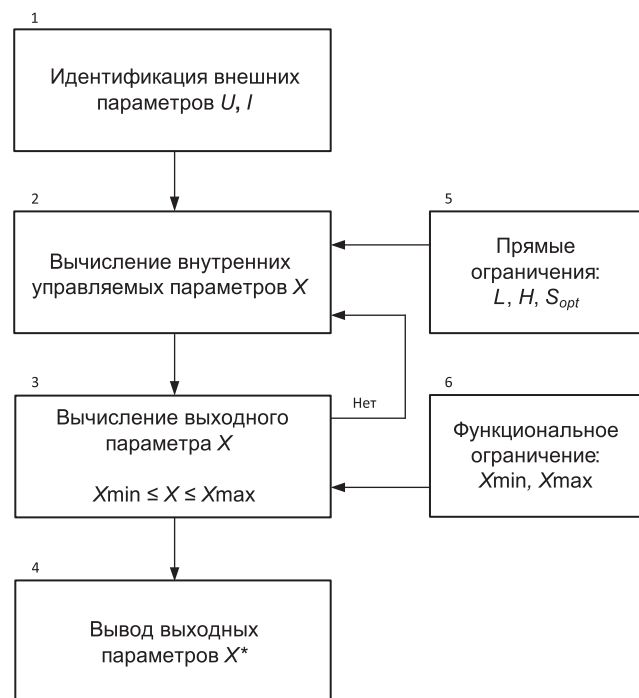


Рис. 1. Алгоритм решения задачи оптимального управления ФКУ

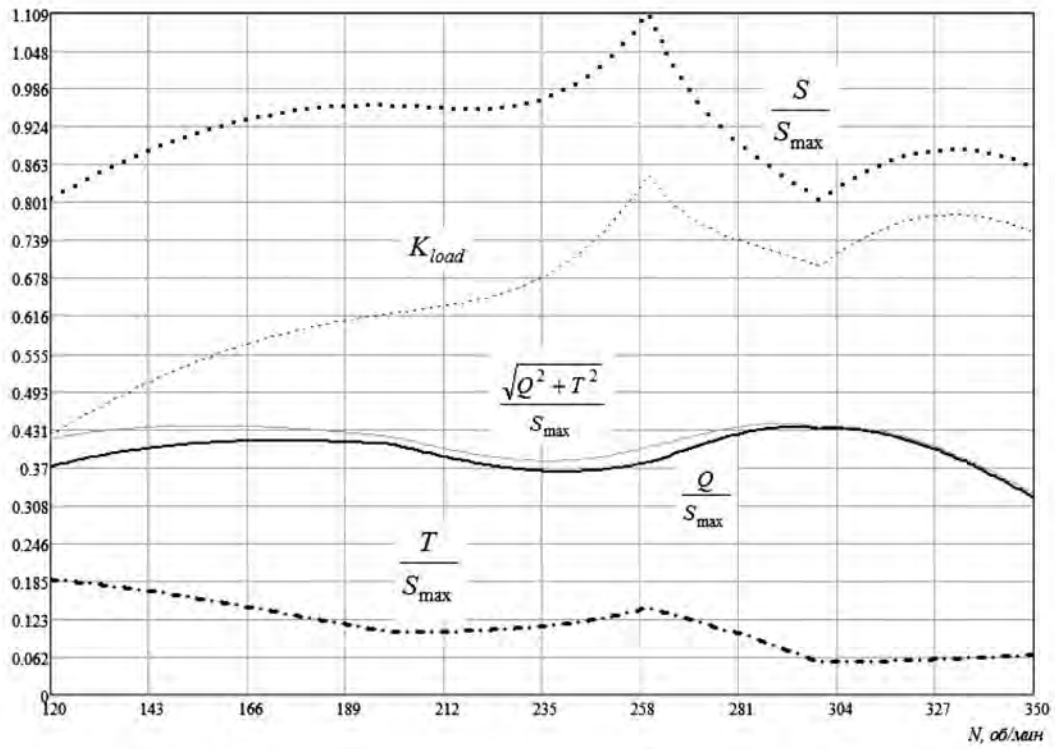


Рис. 2. Экспериментальные зависимости показателей качества электроэнергии в зависимости от нагрузки с системой оптимального управления

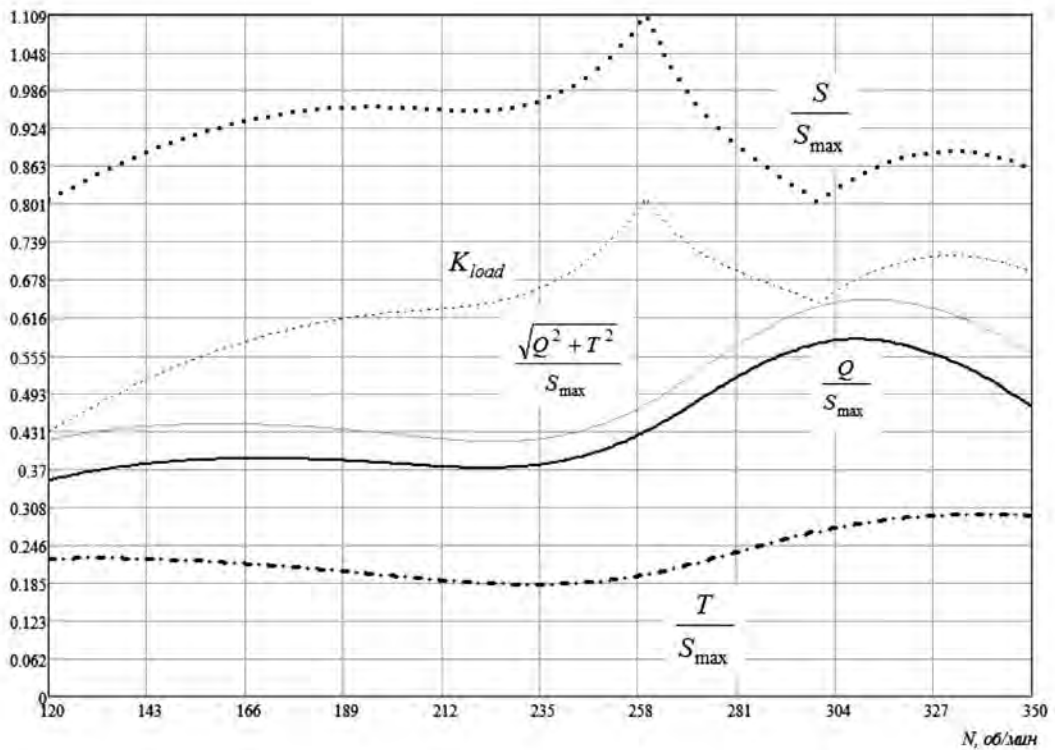


Рис. 3. Экспериментальные зависимости показателей качества электроэнергии при различных нагрузках без оптимального управления

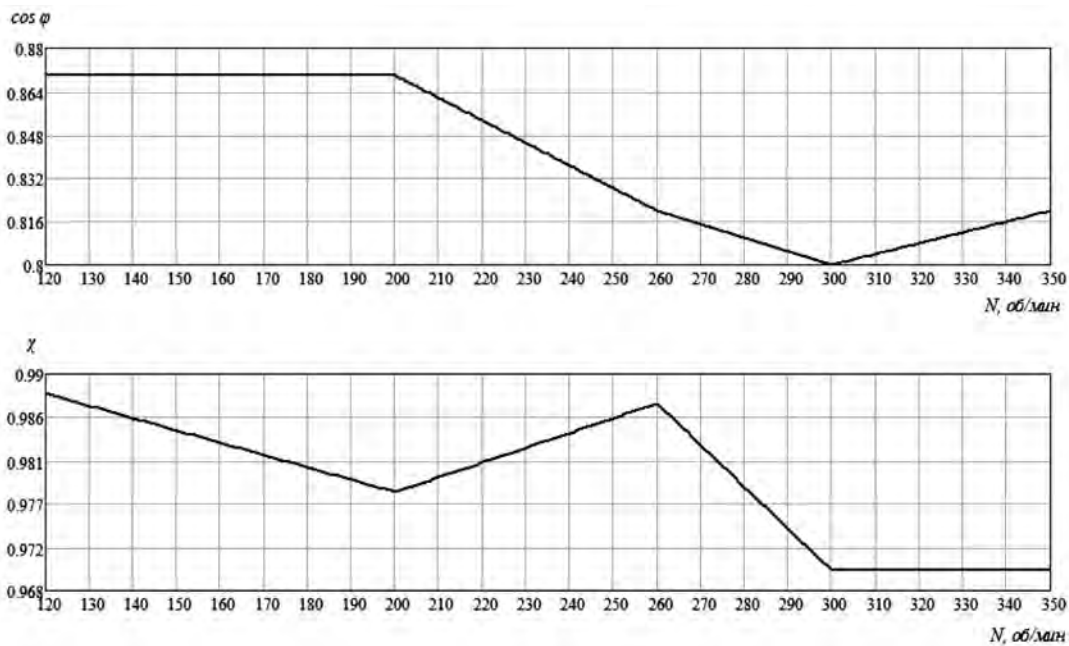


Рис. 4. Значения показателей качества в различных режимах работы ГЭД

Таким образом, при определении установленной мощности ФКУ, наилучший показатель может быть достигнут с применением системы интеллектуальной поддержки принятия решений по регулированию параметров электроэнергии. Показано, что предложенный вариант реализации ФКУ с поддержкой принятия решений обеспечивает максимально полное использование ресурсов ЭЭС при поддержании заданных показателей качества электроэнергии.

### Выводы

1. Определен обобщенный показатель качества электроэнергии в автономной ЭЭС, вводимый как критерий оценки качества функционирования ФКУ.
2. При определении установленной мощности ФКУ, наилучший показатель может быть достигнут с применением в системе управления ФКУ интеллектуальной поддержки принятия решений по регулированию параметров электроэнергии.
3. Произведена формализация задачи оптимального управления ФКУ (обобщенным показателем качества электроэнергии) в автономной ЭЭС.

### Литература

- [1] Кенс Ю. А. Реактивная мощность в линейных электрических цепях при периодических несинусоидальных режимах / Ю. А. Кенс, А. В. Жураховский // Электричество. — 1998. — № 12. — С. 55–63.
- [2] Маевский О. А. Энергетические показатели вентиляционных преобразователей. — М.: Энергия, 1978. — 320 с.
- [3] Мельников Н. А. Реактивная мощность в электрических сетях. — М.: Энергия, 1975. — 128 с.
- [4] Солодухо Я. Ю. Состояние и перспективы внедрения в электропривод статических компенсаторов реактивной мощности (обобщение отечественного и зарубежного опыта). — М.: Информэлектро, 1981. — 89 с.
- [5] Солодухо Я. Ю. Тенденции компенсации реактивной мощности. 4.1. Реактивная мощность при несинусоидальных режимах работы. — М.: Информэлектро, 1987. — 50 с.
- [6] Солодухо Я. Ю. Вентильные электроприводы постоянного тока и обеспечение их электромагнитной совместимости в металлургических и специальных установках: Автореф. дис. докт. техн. наук/ Московский энергетический институт. — М., 1990. — 40 с.
- [7] Супрунович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 136 с.
- [8] Правила класифікації і побудови морських суден. — Київ: Регістр судноплавства України, 2002. — Том 3. — 360 с.
- [9] Жиленков А. А. Моделирование адаптивного управления в сложных распределенных системах с идентификацией параметров / А. А. Жиленков, С. Г. Чёрный // Вісник Хмельницького національного університету. — 2013. — № 6. — С. 253–260.
- [10] Болотин Б. И., Вайнер В. Л. Инженерные методы расчетов устойчивости судовых автоматизированных систем. — Л.: Судостроение, 1974. — 332 с.
- [11] Ботвинник М. М. Регулирование возбуждения и статическая устойчивость синхронной машины. — М.: Госэнергоиздат, 1950. — 63 с.
- [12] Маркович И. И. Режимы энергетических систем. — М.: Энергия, 1969. — 350 с.



- [13] Толшин В. И., Болотин Б. И., Конкс Г. А. Влияние топливной аппаратуры на устойчивость дизель-генератора мощностью 150 кВт // Труды Науч. исслед. ин-та информации тяж. маш. — 1969. — № 4. — С. 3–9.
- [14] Коноплев К. Г. Импульсное регулирование синхронных генераторов. — Севастополь: СевНТУ, 2008. — 258 с.
- [15] Константинов В. Н. Системы и устройства автоматизации судовых электроэнергетических установок. — Л.: Судостроение, 1988. — 312 с.

*Cherney S.G., Zhilenkov A.A., Titov I.L., Zhelezniak A.A.*

Kerch State Marine Technological University “KSM TU”. Ukraine, Kerch

## THE ELEMENT ANALYSIS OF MATHEMATICAL STRUCTURES UNDER UNCERTAINTY FOR IDENTIFICATION OF COMPLEX PROCESSES

*The article defined the generalized index of power quality in the autonomous power system (APS), which administered criterion for assessing the quality of functioning of filter- compensating device (PCD). The analysis found the best indicator in determining the power PKU can be achieved with the use of the control system PCD element intelligent decision support to regulate the parameters of electricity. Presented and justified, that this can achieve optimum quality index using a total installed capacity of PCD. The formalization of the optimal control problem in the autonomous PCD APS. The algorithm for solving optimal control of PCD.*

*Keywords:* decision-making criteria, optimal control, power.

### References

- [1] Kенс Ю. А. Реактивная мощность в линейных электрических цепях при периодических несинусоидальных режимах / Ю. А. Кенс, А. В. Журавовский // Электричество. — 1998. — № 12. — С. 55–63. (In Russian).
- [2] Маевский О. А. Энергетические показатели вентиляционных преобразователей. — М.: Энергия, 1978. — 320 с. (In Russian).
- [3] Мельников Н. А. Реактивная мощность в электрических сетях. — М.: Энергия, 1975. — 128 с. (In Russian).
- [4] Солодухо Я. Ю. Состояние и перспективы внедрения в электропривод статических компенсаторов реактивной мощности (обобщение отечественного и зарубежного опыта). — М.: Информэлектро, 1981. — 89 с. (In Russian).
- [5] Солодухо Я. Ю. Тенденции компенсации реактивной мощности. 4.1. Реактивная мощность при несинусоидальном режиме работы. — М.: Информэлектро, 1987. — 50 с. (In Russian).
- [6] Солодухо Я. Ю. Вентиляющие электроприводы постоянного тока и обеспечение их электромагнитной совместимости в металлургических и специальных установках: Автореф. дис. докт. техн. наук/ Московский энергетический институт. — М., 1990. — 40 с. (In Russian).
- [7] Супрунович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 136 с. (In Russian).
- [8] Правила классификации и постройки морских судов. — Киев: Регистр судноплавства Украины, 2002. — Том 3. — 360 с. (In Ukrainian).
- [9] Zhilenkov A. A. Modelirovanie adaptivnogo upravlenija v slozhnyh raspredelennyh sistemah s identifikaciej parametrov / A. A. Zhilenkov, S. G. Cherney // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. — 2013. — № 6. — С. 253–260. (In Russian).
- [10] Болотин В. И., Вайнер В. Л. Инженерные методы расчетов устойчивости судовых автоматизированных систем. — Л.: Судостроение, 1974. — 332 с. (In Russian).
- [11] Ботвинник М. М. Регулирование возбуждения и статической устойчивости синхронной машины. — М.: Госэнергоиздат, 1950. — 63 с. (In Russian).
- [12] Маркович И. И. Режимы энергетических систем. — М.: Энергия, 1969. — 350 с.
- [13] Толшин В. И., Болотин Б. И., Конкс Г. А. Влияние топливной аппаратуры на устойчивость дизель-генератора мощностью 150 кВт // Труды Науч. исслед. ин-та информации тяж. маш. — 1969. — № 4. — С. 3–9. (In Russian).
- [14] Коноплев К. Г. Импульсное регулирование синхронных генераторов. — Севастополь: СевНТУ, 2008. — 258 с. (In Russian).
- [15] Константинов В. Н. Системы и устройства автоматизации судовых электроэнергетических установок. — Л.: Судостроение, 1988. — 312 с. (In Russian).