

УДК 621.300

## **Electromagnetic Compatibility Issues on Power Systems in the Petroleum Industry**

**Denis E. Egorov, Valery P. Dovgun\*,  
Edouard A. Petrovsky and Viktor V. Novikov**  
*Siberian Federal University  
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia*

Received 21.05.2014, received in revised form 12.06.2014, accepted 14.08.2014

---

*The widespread use of adjustable speed drivers (ASD) in the petrochemical industry significantly increases the power-quality problems on the distribution network. Such problems can be reduced by adding passive harmonic filters in the distribution system. This paper presents a method for design passive power filters installed at the point of common coupling with ASD. The filter designed with the help of proposed method satisfies requirements of reactive power compensation and harmonic filtering. The design example illustrating the proposed approach is given. In the proposed example, more than 50 % harmonic reduction and full reactive power compensation are achieved.*

*Keywords: nonlinear load, passive power filters, reactive power compensation.*

---

## **Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в системах электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий**

**Д.Э. Егоров, В.П. Довгун,  
Э.А. Петровский, В.В. Новиков**  
*Сибирский федеральный университет  
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

---

*Широкое использование систем регулируемого электропривода на нефтеперерабатывающих предприятиях (НПП) приводит к значительному ухудшению качества электрической энергии в сетях НПП. Основным средством решения этих проблем являются силовые фильтры гармоник. В статье предложен метод проектирования пассивных силовых фильтров, устанавливаемых в точках подключения систем регулируемого электропривода. Устройство, спроектированное с помощью предлагаемого метода, выполняет одновременно функции*

компенсатора реактивной мощности на частоте основной гармоники и фильтра высших гармоник. Приведен пример расчета ФКУ с помощью предлагаемого метода. Показано, что спроектированное устройство обеспечивает значительное, более чем на 50 %, ослабление гармоник тока и компенсацию реактивной мощности.

*Ключевые слова:* нелинейная нагрузка, пассивные силовые фильтры, компенсация реактивной мощности.

## Введение

Эффективность функционирования нефтеперерабатывающих предприятий (НПП) в значительной степени определяется надежностью и экономичностью работы системы электропитания. Низкое качество электроэнергии приводит к увеличению потерь в электродвигателях, трансформаторах, линиях электропередачи, выражается в ускоренном старении изоляции электрооборудования, влияет на надежность работы устройств релейной защиты и автоматики [1-4]. Поэтому обеспечение качества электроэнергии признано актуальной задачей, решение которой позволит уменьшить потери и обеспечит надежное функционирование электротехнического комплекса НПП.

Одним из основных направлений рационального использования электроэнергии на предприятиях нефтяного комплекса является применение систем регулируемого электропривода. Источниками питания таких систем служат многофазные вентильные преобразователи, имеющие большую индуктивность со стороны постоянного напряжения. Мощность преобразователей составляет от единиц до сотен кВт. На стороне питающей сети преобразователь эквивалентен источнику тока с большим внутренним сопротивлением. Входной ток трехфазного вентильного преобразователя системы регулируемого электропривода показан на рис. 1.

Гармонический состав токов на входах многофазных выпрямителей (по отношению к 1-й гармонике) приведен в табл. 1 [1], где  $1/n$  – «пульсность» выпрямителя.

Широкое внедрение вентильных преобразователей и частотно-регулируемых электроприводов в сетях нефтеперерабатывающих предприятий приводит к значительному искажению формы кривых токов и напряжений. Коэффициент искажения синусоидальной формы кривой тока может достигать 60 %. Доминирующими в спектре тока являются 5, 7, 11, 13-я гармоники. Это оказывает негативное воздействие на функционирование систем электроснабжения.

В свою очередь, регулируемые электроприводы чувствительны к флуктуациям, несимметрии, искажению синусоидальной формы напряжения. Ухудшение качества электроэнергии

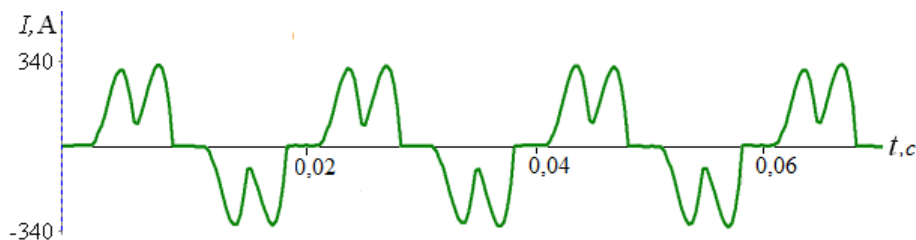


Рис. 1. Входной ток вентильного преобразователя

Таблица 1. Относительные значения токов гармоник многофазных выпрямителей

n	5	7	11	13	17	19	23	25
6	0.175	0.11	0.045	0.029	0.015	0.01	0.009	0.008
12	0.021	0.014	0.075	0.059	0.011	0.009	0.015	0.011

приводит к сбоям в их работе. Это определяет необходимость обеспечения электромагнитной совместимости преобразователей частоты с системой электроснабжения НПП.

Снижение потерь электроэнергии в сетях электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий достигается за счет компенсации реактивной мощности, осуществляемой с помощью конденсаторных установок (КУ), подключаемых к трансформаторам распределительных подстанций.

Искажение формы напряжений и токов отрицательно влияет на работоспособность КУ. Потери энергии в конденсаторах пропорциональны частоте. Поэтому присутствие в сетевом напряжении гармоник высоких порядков приводит к значительному повышению потерь, ускоренному старению изоляции и выходу конденсаторов из строя. Согласно данным, приводимым в работах [3, 4], в сетях НПП наблюдаются частые отключения конденсаторных установок, вызванные перегрузкой конденсаторов по току. В [4] отмечается, что причиной перегрузки конденсаторов являются резонансные режимы, возникающие в параллельных колебательных контурах, образуемых емкостями КБ и индуктивностями трансформаторов.

Необходимо учитывать также, что в условиях несинусоидальных режимов происходит снижение компенсирующего эффекта конденсаторных батарей. Коэффициент мощности при несинусоидальных режимах определяется выражением

$$\lambda = \cos \varphi_1 \frac{1}{\sqrt{1 + (k_I)^2}} = \cos \varphi_1 k_{\text{и}}.$$

Здесь  $\cos \varphi_1$  – коэффициент мощности для основной гармоники;

$$k_{\text{и}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (k_I)^2}} \quad \text{– коэффициент искажения, обусловленный несинусоидальным режи-}$$

мом.

Таким образом, при несинусоидальных режимах использование компенсирующих конденсаторов для компенсации реактивной мощности оказывается неэффективным. Основным средством компенсации высших гармоник в системах электроснабжения являются пассивные фильтры гармоник. Пассивные фильтры осуществляют одновременно подавление гармоник и компенсацию реактивной мощности. Поэтому более точное название таких устройств – фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ).

В простейшем варианте пассивный фильтр гармоник представляет собой последовательный резонансный контур, образованный последовательным соединением конденсаторной батареи и реактора. Резонансную частоту контура выбирают в диапазоне 4.4 – 4.7 частоты основной гармоники. Такой простейший фильтр обеспечивает компенсацию реактивной мощности

на частоте основной гармоники и обеспечивает ослабление 5-й гармоники тока. Одновременно уменьшается частота резонанса токов. Это исключает опасность возникновения резонанса на частотах высших гармоник при использовании многофазных схем выпрямления.

Несинусоидальные токи, потребляемые регулируемыми электроприводами, имеют широкий спектр. Поэтому использование простейшего однозвенного ФКУ во многих случаях не дает необходимого эффекта. Подавление нескольких гармоник ( $n = 7, 11, 13, \dots$ ) обеспечивают с помощью структуры, образованной параллельным соединением нескольких резонансных контуров, настроенных на частоты отдельных гармоник (рис. 2).

Задача проектирования ФКУ заключается в определении конфигурации и расчете параметров фильтра, обеспечивающего ослабление высших гармоник и генерирующего заданную величину реактивной мощности.

Существующие методы проектирования пассивных ФКУ [1, 5, 6] заключаются в расчете параметров последовательных резонансных контуров, образующих фильтр. Такие методы позволяют контролировать частотные характеристики только на частотах резонансов отдельных ветвей. Однако составной фильтр, образованный несколькими контурами, представляет сложную резонансную систему, в которой необходимо учитывать взаимное влияние ветвей фильтра и питающей сети, поскольку отдельные ветви фильтра образуют параллельные колебательные контуры с индуктивностью сети.

Спектр тока идеального вентильного преобразователя содержит только нечетные гармоники. Однако в реальных условиях спектры токов вентильных преобразователей могут содержать неканонические или аномальные гармоники, в том числе четные. Причинами возникновения неканонических гармоник могут быть колебания и несимметрия напряжений сети, разброс параметров нелинейных нагрузок и т.д. [1, 5]. Согласно оценкам, приведенным в [1], уровень 4-й гармоники может достигать 5 % тока 1-й гармоники. Если частота резонанса токов системы фильтр – внешняя сеть совпадает или близка к частоте одной из таких гармоник, амплитуда последней может возрасти в несколько раз. Примеры ухудшения качества электроэнергии в сетях предприятий нефтяной отрасли, вызванного резонансным усилением аномальных гармоник, рассмотрены в работах [7, 8].

Таким образом, необходимы методы расчета ФКУ, позволяющие контролировать не только резонансные частоты отдельных звеньев, но и частоты параллельных резонансов системы

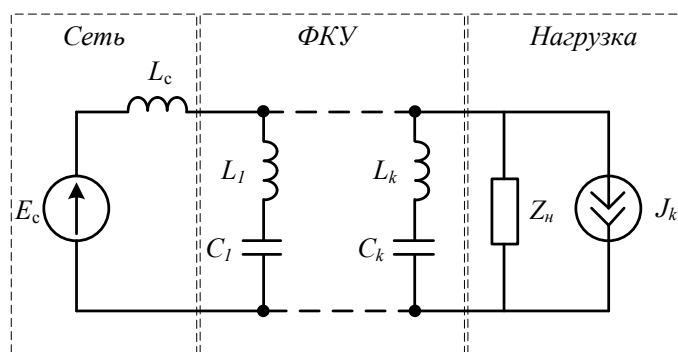


Рис. 2. Система многочастотный фильтр – питающая сеть

пассивный фильтр – внешняя сеть для того, чтобы исключить усиление неканонических гармоник. Эту проблему решают обычно методом проб и ошибок, рассматривая несколько вариантов фильтров [6, 8]. Однако такой метод требует значительного времени, а результат во многом зависит от опыта и интуиции проектировщика.

Методы расчета пассивных ФКУ, позволяющие контролировать частотную характеристику входного сопротивления фильтра, рассмотрены в [9, 10]. В этих работах показано, что частоты параллельных резонансов системы фильтр – внешняя сеть можно варьировать, изменяя расположение полюсов функции операторного входного сопротивления фильтра.

Зависимость частотных характеристик ФКУ от параметров сопротивления  $Z_{\phi}(s)$  имеет нелинейный характер. Поэтому для получения наилучшего решения целесообразно использовать методы оптимизации. Задача оптимального проектирования ФКУ заключается в определении параметров фильтра минимального порядка, обеспечивающего ослабление высших гармоник и генерирующего заданную величину реактивной мощности.

Методы оптимального проектирования ФКУ изложены в работах [11-13]. В работе [11] целевой функцией является коэффициент искажения синусоидальной кривой напряжений в узлах сети. В статьях [12, 13] в качестве целевой функции рассматриваются критерии, определяющие эффективность ослабления высших гармоник тока и напряжения. Требования к реактивной мощности фильтра задаются в виде ограничений-равенств. Варьируемыми параметрами являются коэффициенты распределения реактивной мощности между звеньями фильтра [12] или емкости звеньев [13].

В настоящей статье рассмотрен метод оптимального проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для систем регулируемого электропривода, основанный на минимизации целевой функции в пространстве параметров операторного входного сопротивления фильтра. Варьируемые параметры – полюсы, нули и коэффициент нормирования операторного сопротивления. Критерием, характеризующим качество функционирования ФКУ, выступает коэффициент мощности в точке общего присоединения ФКУ и нелинейной нагрузки.

Проектирование ФКУ выполняется в следующем порядке. На первом шаге с помощью методов оптимизации определяются параметры сопротивления фильтра минимального порядка, обеспечивающего требуемую реактивную мощность и ослабление гармонических искажений в сети. На втором шаге осуществляется расчет элементов фильтра.

### Расчет пассивных фильтрокомпенсирующих устройств

Пассивный фильтр гармоник представляет  $LC$ -двухполюсник, операторное входное сопротивление которого определяется выражением

$$Z_{\phi}(s) = H \frac{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)}{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_{pj}^2)} = H \frac{N(s)}{D(s)}. \quad (1)$$

Здесь  $\omega_{zi}$  и  $\omega_{pj}$  – нули и полюсы входной функции,  $s$  – комплексная частотная переменная. Постоянную  $H$  называют коэффициентом нормирования. Примем, что входное сопротивление фильтра равно отношению четного и нечетного полиномов. В этом случае полюс  $\omega_{p1} = 0$ .

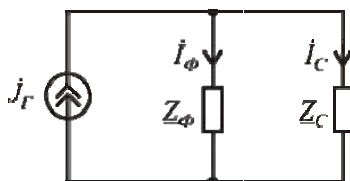


Рис. 3. Эквивалентная схема фильтр – питающая сеть

Представим систему фильтр – питающая сеть эквивалентной схемой, показанной на рис. 3. Здесь  $Z_c = R_c + j\omega L_c$  – комплексное сопротивление сети со стороны шин, к которым присоединена нелинейная нагрузка,  $Z_\phi$  – комплексное сопротивление фильтра. Нелинейная нагрузка моделируется источником тока  $J_G$ .

Коэффициент передачи тока  $k$ -й гармоники в сеть

$$F_c(j\omega) = \frac{I_c}{J_G} = \frac{Z_\phi}{Z_\phi + Z_c}. \quad (2)$$

Процедура синтеза реактивного двухполюсника заключается в разложении сопротивления или проводимости двухполюсника, реализующего фильтр, на сумму элементарных слагаемых. Каждое слагаемое реализуется параллельным или последовательным колебательным контуром.

Представим проводимость  $Y_\phi(s)$  в виде суммы слагаемых:

$$Y_\phi(s) = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^n \frac{k_i s}{s^2 + \omega_{zi}^2}. \quad (3)$$

Формуле (3) соответствует структура, образованная параллельным соединением последовательных колебательных контуров, имеющих резонансные частоты  $\omega_{zi}$ . Вычет  $k_i$  определяется по формуле

$$k_i = \left( s^2 + \omega_{zi}^2 \right) \frac{Y_\phi(s)}{s} \Big|_{s^2 = -\omega_{zi}^2}. \quad (4)$$

Значения элементов  $i$ -го колебательного контура находят с помощью соотношений:

$$L_i = \frac{1}{k_i}; \quad C_i = \frac{k_i}{\omega_{zi}^2}. \quad (5)$$

Мы привели краткие сведения о процедуре синтеза пассивного фильтра.

### Оптимизация характеристик фильтра

Установка фильтрокомпенсирующего устройства должна приводить к уменьшению уровня высших гармоник в спектре тока сети и уменьшению фазового сдвига между напряжением и током на частоте первой гармоники.

Задачу оптимизации характеристик ФКУ сформулируем следующим образом: необходимо найти параметры сопротивления пассивного фильтра, обеспечивающего минимум целевой функции

$$\Phi = w_1 \Phi_1 + w_2 \Phi_2 \quad (6)$$

при выполнении ограничений на расположение полюсов:

$$\omega_{pi} < \omega_{zi} < \omega_{p(i+1)}, \quad i = 1, 2, \dots$$

В формуле (6) приняты следующие обозначения. Множители  $w_1, w_2$  – весовые коэффициенты, учитывающие важность отдельных критериев, образующих целевую функцию. Критерий  $\Phi_1$  определяет реактивную мощность ФКУ:

$$\Phi_1 = \frac{(Q_0 - Q_{\text{кв}})^2}{S_{\text{н}}^2}.$$

Здесь  $Q_{\text{кв}}$  – мощность, генерируемая ФКУ на частоте основной гармоники,  $S_{\text{н}}$  – полная мощность нагрузки,  $Q_0$  – реактивная мощность, которую необходимо компенсировать в точке общего присоединения ФКУ и нелинейной нагрузки. Величину  $Q_0$  можно определить по формуле

$$Q_0 = P_{\text{н}}(tg\varphi_{\text{н}} - tg\varphi_{\text{ЭС}}),$$

где  $P_{\text{н}}$  – активная мощность нагрузки,  $tg\varphi_{\text{н}}$  – коэффициент реактивной мощности нагрузки,  $tg\varphi_{\text{ЭС}}$  – коэффициент реактивной мощности нагрузки, задаваемый энергосистемой.

Критерий  $\Phi_2$  определяет селективные свойства проектируемого фильтра:

$$\Phi_2 = (k_{\text{тU}})^2 + (k_{\text{тI}})^2.$$

Здесь  $k_{\text{тI}}$  – коэффициент гармонической составляющей по току;  $k_{\text{тU}}$  – коэффициент гармонической составляющей по напряжению.

Во многих случаях искажение формы кривой напряжения невелико и функцию  $\Phi_2$  можно упростить:

$$\Phi_2 = (k_{\text{тI}})^2. \quad (7)$$

Отметим, что в отличие от методов, рассмотренных в статьях [12, 13], целевая функция, определяемая выражением (6), не содержит ограничения-равенства, определяющего реактивную мощность на частоте основной гармоники. Это упрощает рельеф целевой функции.

Расчет фильтрокомпенсирующего устройства выполняется в следующем порядке:

1. На первом шаге определяется спектральный состав несинусоидальных токов и напряжений, создаваемых нелинейными нагрузками. На основании этой информации определяется порядок фильтра и частоты нулей входного сопротивления ФКУ. Для упрощения расчетов частоты нулей и полюсов целесообразно выбирать нормированными по отношению к частоте первой гармоники. В первоначальном варианте полюсы  $Z_{\phi}(s)$  можно выбрать совпадающими с частотами четных гармоник. Функция входного сопротивления определяет структуру и порядок проектируемого фильтра. Для проектирования фильтра, имеющего минимальную стоимость, целесообразно рассмотреть несколько функций входного сопротивления возрастающего порядка. В процессе оптимизации выбирают сопротивление минимального порядка, обеспечивающее требуемые параметры качества электрической энергии.

2. На втором шаге определяется реактивная мощность ФКУ на частоте основной гармоники  $Q_{ку}$ .
3. На третьем шаге минимизируется целевая функция  $\Phi$ , определяемая формулой (6). Для поиска минимума можно использовать стандартные процедуры оптимизации из библиотеки Matlab. В результате минимизации определяются параметры входного сопротивления фильтра.
4. Осуществляется синтез реактивного двухполюсника, реализующего сопротивление  $Z_{\phi}(s)$ , определенное на предыдущем этапе. Нормированные значения элементов фильтра  $C_{i^*}, L_{i^*}$  рассчитываются с помощью формул (5, 6). Затем производится денормирование значений элементов по отношению к частоте основной гармоники. Частоту денормирования следует выбирать на 4-5 % меньше частоты основной гармоники. Это позволит учесть эффект уменьшения емкости конденсаторов в результате старения. На заключительном этапе определяется реактивная мощность, генерируемая секциями фильтра на частоте первой гармоники:

$$Q_i = U^2 C_{i^*} \frac{n^2}{1-n^2}.$$

### Пример расчета фильтрокомпенсирующего устройства

Для иллюстрации предлагаемого метода рассмотрим пример расчета фильтрокомпенсирующего устройства.

Необходимо рассчитать пассивный фильтр гармоник для установки на шинах трансформаторной подстанции 380 В нефтеперерабатывающего предприятия. Фильтр должен обеспечивать компенсацию реактивной мощности и подавление высших гармоник. Нелинейной нагрузкой являются электроприводы с регулируемой скоростью вращения. Гармонический состав тока нелинейной нагрузки приведен в табл. 1. Спектр тока содержит как нечетные, так и аномальные четные гармоники. Активная и реактивная мощности нагрузки составляют 132 кВт и 131 квар соответственно.

Рассмотрим два варианта фильтрокомпенсирующих устройств.

**Вариант 1.** Однозвенный фильтр состоит из последовательно включенных компенсирующего конденсатора и реактора. Относительное значение резонансной частоты контура по отношению к частоте основной гармоники выбрано равным 4.7. Значения гармоник тока в сети

Таблица 1. Гармонический состав токов в линии (токи указаны в амперах)

	$I_1$	$I_2$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$I_7$	$I_{11}$	$I_{13}$
Без ФКУ	404	0.81	0.81	40,4	0.81	48,6	24,6	16,2
Однозвенный ФКУ	407,1	0,84	1,23	7,76	0,52	35,9	20,1	13,4
С ФКУ (нач. приближение)	407,1	0.84	1.04	21.2	0.83	19.6	3.49	8.52
Оптимизированный вариант	407,1	0,84	1,10	20,6	0,797	18,2	5.71	10.4
Распределение емкостей 0.4/0.4/0.2	407,1	0,84	1.05	21.3	1.083	18.7	4.26	8.79



после установки однозвенного ФКУ приведены в табл. 1. Включение реактора последовательно с компенсирующим конденсатором позволило существенно уменьшить уровень пятой гармоники. Однако значения остальных гармоник изменились незначительно.

**Вариант 2.** Многозвенный фильтр, образованный параллельным соединением трех звеньев, настроенных на частоты 5, 7 и 11-й гармоник. Используем для расчета фильтра рассмотренную процедуру оптимизации.

*Расчет начального приближения.* Нормированные значения частот нулей  $Z'_\phi(s)$ :  $n_5 = 5$ ,  $n_7 = 7$ ,  $n_{11} = 11$ . Частоты полюсов  $Z'_\phi(s)$  выберем равными:  $\omega_{p2} = 6$ ,  $\omega_{p3} = 8$ .

Функция входного сопротивления фильтра, нормированная к частоте первой гармоники,

$$Z'_\phi(s) = \frac{(s^2 + 25)(s^2 + 49)(s^2 + 121)}{s(s^2 + 5.4^2)(s^2 + 9.4^2)}.$$

Коэффициент нормирования, обеспечивающий требуемую реактивную мощность на частоте первой гармоники, равен:

$$H = \frac{U_\phi^2}{Q Z'_\phi(j1)} = \frac{(660)^2}{(129) \cdot 10^3 \cdot 56.194} \approx 0.301.$$

Параметры звеньев фильтра, реализующего функцию входного сопротивления, выбранного в качестве начального приближения, приведены в табл. 2. Суммарная реактивная мощность, генерируемая звеньями ФКУ, равна 129 квар. На рис. 4 показан рельеф целевой функции  $\Phi_2$ , определяемой формулой (7). Начальному приближению соответствует точка  $P_0$ .

Для нахождения минимума целевой функции использовался метод Нелдера–Мида. Весовые коэффициенты  $w_1$  и  $w_2$  были выбраны равными 1. Параметры входного сопротивления фильтра, полученные в результате оптимизации, равны:  $\omega_{p2} = 6.1$ ;  $\omega_{p3} = 9.8$ ;  $H = 0.421$ . Параметры звеньев фильтра, реализующего оптимизированное входное сопротивление, приведены в табл. 2. Реактивная мощность, генерируемая ФКУ, равна 129 квар.

Во многих случаях при проектировании ФКУ суммарную емкость конденсаторов делят поровну между звеньями либо пропорционально величине гармоник тока. В табл. 1 и 2 включен вариант, когда емкости конденсаторов распределены в пропорции 0.4/0.4/0.2. Этому варианту соответствует точка  $P_2$  на рис. 4.

Таблица 2. Параметры звеньев фильтра

№ звена	Начальное приближение		Оптимизированный вариант		Распределение емкостей 0.4/0.4/0.2	
	$Li$ , мГн	$Si$ , мкФ	$Li$ , мГн	$Si$ , мкФ	$Li$ , мГн	$Si$ , мкФ
1	4.66	88.10	3.61	115.30	5.64	73.83
2	7.69	27.24	4.24	50.14	2.88	73.83
3	1.24	68.52	4.49	19.14	2.33	36.92
Суммарные значения	13.59	183.86	12.34	184.58	10.85	184.58

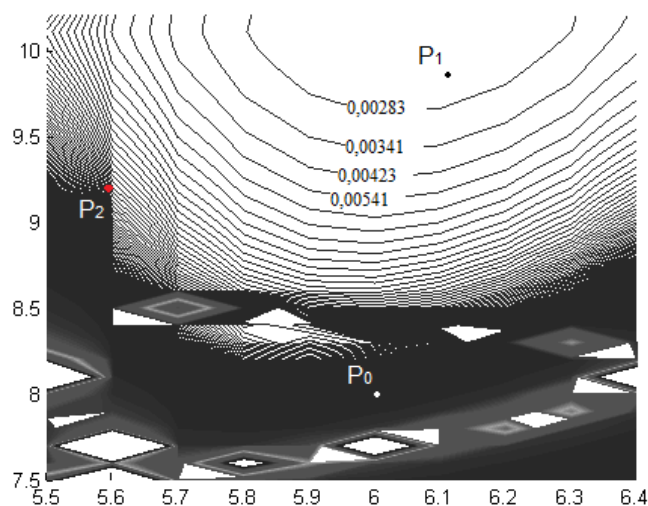


Рис. 4. Рельеф целевой функции

В результате расчета определены параметры пассивного ФКУ, обеспечивающего компенсацию реактивной мощности и подавление канонических нечетных гармоник. После установки ФКУ коэффициент искажения синусоидальной формы кривой тока уменьшился более чем в два раза (с 17,3 до 7,4 %). При этом характеристики спроектированного устройства исключают усиление неканонических четных гармоник. Вероятностный анализ, проведенный с учетом случайного разброса номиналов конденсаторов и реакторов, показал, что из трех рассмотренных в статье вариантов оптимизированный фильтр имеет наименьшую чувствительность характеристик к вариациям значений элементов.

### Выводы

В статье рассмотрен метод оптимального проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для сетей электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий, основанный на минимизации целевой функции, учитывающей реактивную мощность фильтра, коэффициенты искажения напряжения и тока. Варьируемыми параметрами являются полюсы и коэффициент нормирования операторного сопротивления фильтра. ФКУ, синтезированное с помощью предлагаемой процедуры, обеспечивает подавление высших гармоник в спектрах несинусоидальных токов и напряжений, а также компенсацию реактивной мощности на частоте основной гармоники.

### Список литературы

- [1] Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 1994.
- [2] Хачатурян В.А. Управление электроснабжением нефтеперерабатывающих предприятий в условиях массового применения регулируемого электропривода. СПб., 2002. 64 с.
- [3] Скакунов Д.А. // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2012. № 7. С. 37–42.

- [4] Павлов В.А., Дружинин О.А., Скакунов Д.А. и др. // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2011. № 1. С. 29–31.
- [5] Аррилага Дж., Брэдли, П. Гармоники в электрических системах. М: Энергоатомиздат, 1990.
- [6] Das J. // IEEE trans. on industry applications, January/February. 2004. Vol. 40. No. 1. P. 232–241.
- [7] Wu C.-J., Chiang Shin-Shong Yen, Ching-Jing Liao. // IEEE transactions on power delivery, 1998. Vol. 13. No. 3. P. 800–806.
- [8] Merhej S.J., Nichols W.H. // IEEE trans. on industry applications. 1994. Vol. IA-30. No. 3. P. 533–542.
- [9] Довгун В.П., Боярская Н.П., Новиков В.В. // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 9-10. С. 31–39.
- [10] Lin K.-P., Lin M.-H., Lin T.-P. // IEEE transactions on industry applications, 1998. Vol. 34. No. 4. P. 640–648.
- [11] Боярская Н.П. Довгун В.П., Кунгс Я.А. Проблемы компенсации высших гармоник в распределительных сетях агропромышленного комплекса. Красноярск: КрасГАУ, 2012. 123 с.
- [12] Ginn H.L., Czarnecki L.S. // IEEE trans. on power delivery, 2006. Vol. 21. No. 3. P. 1445–1451.
- [13] Maza Ortega J.M., Raian M.B., Mitchell C.I. // European transactions on electrical power. 2006; 16. P. 219–233.