

# Оптимальные фильтрокомпенсирующие устройства для силовых полупроводниковых преобразователей (часть 1)

Леонид Добрусин (Москва)

В статье изложены основы теории и принципов проектирования оптимальных фильтрокомпенсирующих устройств, предназначенных для компенсации воздействия полупроводниковых преобразователей электроэнергии на питающую сеть.

## ВВЕДЕНИЕ

Фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) предназначены для нормализации показателей электромагнитной совместимости (ЭМС) полупроводниковых преобразователей электроэнергии с питающей сетью.

Проблема ЭМС преобразователей рассматривается во взаимосвязи с проблемой качества электрической энергии [1], так как физические явления, сопровождающие процесс преобразования параметров электрической энергии, оказывают отрицательное воздействие на качество электрической энергии в питающей сети (потребление реактивной мощности, генерация гармоник тока, искажение формы кривой напряжения).

Негативные свойства преобразователей стали заметно проявляться в связи с ростом мощности и количества типов преобразователей в промышленных сетях России, питающих преобразователи, уровни высших гармоник напряжения часто не соответствуют нормативным требованиям, что свидетельствует о низкой оснащённости этих сетей ФКУ либо о слабой эффективности используемых ФКУ.

Причины такого положения следует искать в том, что в России проблеме ЭМС преобразователей не уделялось достаточного внимания. Программы разработок и внедрения преобразователей значительно опережали темпы работ по ФКУ, так как применение преобразователей в технологических линиях быстро давало экономический эффект за счёт повышения объёмов производства и качества продукции, в

то время как отсутствие ФКУ косвенно влияло на эти характеристики производственного процесса.

С другой стороны, недостаточность ФКУ в сетях с преобразователями связана с нынешним состоянием отечественных энергосистем, которое характеризуется заниженной по сравнению с оптимальной степенью компенсации реактивной мощности – 0,2...0,3 кВАр на 1 кВт установленной мощности электростанций, в то время как в промышленно развитых странах степень компенсации превышает 0,6 кВАр/кВт, а в отдельных энергосистемах достигает 1 кВАр/кВт.

Низкая степень компенсации реактивной мощности противоречит основной задаче электроэнергетики на современном этапе, которая заключается в максимальной экономии энергоресурсов, снижении потерь электроэнергии в сетях и повышении её качества в узлах потребления.

Если в системах с потребителями синусоидального тока для повышения степени компенсации реактивной мощности достаточно интенсифицировать применение традиционных источников реактивной мощности – батарей конденсаторов, синхронных компенсаторов, – то в сетях, питающих преобразователи, та же задача приобретает определенную специфику [2, 3].

Известно, что наиболее экономичным средством компенсации реактивной мощности являются батареи конденсаторов. В электрических сетях промышленно развитых стран до 50% реактивной мощности компенсируется батареями конденсаторов. При этом

следует учитывать, что подключение конденсаторов приводит к изменению зависимости входного сопротивления сети от частоты, так как емкостное сопротивление конденсаторов и индуктивное сопротивление сети образуют резонансный контур. Полос частотной характеристики контура, как правило, находится в области низких, наиболее мощных гармоник преобразователя. В сетях с потребителями синусоидального тока последствия этого резонанса не проявляются. Однако если в сети имеется преобразователь, генерирующий гармоники тока, то происходит резонансное усиление гармоник тока и напряжения в питающей сети. В таких условиях конденсаторы, хотя и могут теоретически компенсировать реактивную мощность на основной частоте, практически становятся вредным элементом системы электроснабжения, поэтому их приходится отключать. Таким образом, решение проблемы компенсации реактивной мощности заходит в тупик, когда вопросы массового внедрения преобразователей решаются в отрыве от создания средств компенсации их воздействий на питающую сеть.

Выход из этой ситуации достаточно очевиден. Во-первых, необходимо исключить возможность появления полюсов на частотах наиболее мощных гармоник преобразователя и тем самым обеспечить батарею конденсаторов условия для выполнения основной функции – компенсации реактивной мощности. Во-вторых, следует создать условия для локализации гармоник тока преобразователя в узле его подключения к сети, используя ёмкость батареи конденсаторов как базу силового энергетического фильтра.

Решения данных вопросов для систем электроснабжения, питающих преобразователи, настолько тесно взаимосвязаны, что рассматривать их в отрыве друг от друга представля-

ется нецелесообразным. По существу, это две стороны одной проблемы – фильтрокомпенсации преобразователей, суть которой состоит в отыскании оптимальных путей демпфирования отрицательных воздействий преобразователей на питающую сеть.

Именно ФКУ и являются теми электротехническими устройствами, которые практически решают данную проблему [2]. ФКУ обеспечивают компенсацию реактивной мощности, потребляемую преобразователем, и одновременную фильтрацию вносимых им в сеть высших гармоник тока. Тем самым создаются условия для улучшения качества электроэнергии в питающей сети.

Следует отметить ещё одну сторону проблемы фильтрокомпенсации, которую необходимо решать при проектировании ФКУ. Конденсаторные источники реактивной мощности получили широкое распространение благодаря относительно низкой стоимости, удобству эксплуатации и, что крайне важно, малым удельным потерям. Удельные потери современных конденсаторов для компенсации реактивной мощности составляют 0,1...0,5 Вт/кВар. ФКУ также являются конденсаторными источниками реактивной мощности, поэтому для повышения их экономической эффективности надо стремиться, чтобы потери в данном устройстве были максимально приближены к потерям в базовой батарее конденсаторов. Отсюда возникает требование минимизации потерь в ФКУ [3].

Необходимо отметить, что около 80% электроэнергии используется в преобразованном виде. Среднее значение коэффициента сдвига на входе преобразователя равно 0,7, что соответствует потреблению реактивной мощности 1 кВар на 1 кВт активной мощности. Отсюда следует, что более половины дефицита реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий надо компенсировать с помощью ФКУ.

Для повышения эффективности этого направления компенсации реактивной мощности задача минимизации потерь в ФКУ так же актуальна, как в конденсаторостроении. Однако она не может быть решена только за счёт применения в ФКУ экономических конденсаторов, так как потери в реакторах и резисторах ФКУ превышают потери в конденсаторах. Поэтому общее решение этой задачи со-

стоит в поиске рациональных схем ФКУ с минимальным объёмом реакторов и резисторов, необходимых для придания схеме требуемых фильтрующих свойств, и последующей параметрической оптимизации схемы ФКУ по минимуму потерь.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФКУ

Задача формулируется следующим образом. Вводятся векторы:

- 1) **X** – вектор реактивной мощности ФКУ:

$$\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_p, \dots, x_n]^T, \quad (1)$$

где  $x_i$  – компоненты вектора, физически соответствующие реактивным мощностям  $i$ -ых фильтров;  $n$  – общее число фильтров.

- 2) **G1, H1** – векторы нижних и верхних границ реактивной мощности ФКУ. Вектор **X** является вектором внутренних управляемых параметров, векторы **G1, H1** – векторами прямых ограничений на управляемые параметры, причём:

$$g_i \leq x_i \leq b_i, \quad (2)$$

где  $g_i, b_i$  –  $i$ -е компоненты векторов **G1, H1**.

- 3) **D, S** – векторы добротностей и относительных частот настройки (гармоник настройки) ФКУ:

$$\mathbf{D} = [d_1, \dots, d_p, \dots, d_n]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{S} = [s_1, \dots, s_p, \dots, s_n]^T, \quad (4)$$

Причём  $d_i, s_i$  соответствуют добротности и гармонике настройки  $i$ -го фильтра.

Типы каждого фильтра  $d_i, s_i$  предполагаются заданными.

Векторы **D** и **S** являются векторами внутренних постоянных параметров.

- 4) **Y<sub>CT</sub>** – вектор проводимости приходящей сети:

$$\mathbf{Y}_{CT} = [Y_{CT1}, \dots, Y_{CTp}, \dots, Y_{CTn}]^T. \quad (5)$$

- 5) **I** – вектор гармоник тока преобразователя:

$$\mathbf{I} = [i_1, \dots, i_p, \dots, i_n]^T. \quad (6)$$

В формулах (5), (6) обозначено:  $Y_{CTi}, i_i$  – компоненты векторов **Y<sub>CT</sub>, I**, физически соответствующие про-

водимости сети на частоте  $n_i$ -й гармоники и току  $n_i$ -й гармоники;  $l$  – число гармоник, учитываемых в расчёте.

Кроме того, заданы:

$$U \text{ – напряжение сети,} \quad (7)$$

$$Q \text{ – реактивная мощность ФКУ.} \quad (8)$$

Векторы **Y<sub>CT</sub>, I**, а также параметр  $U$  относятся к группе внешних параметров, параметр  $Q$  – к прямым ограничениям.

Выходными параметрами задачи являются:

$$K_{HH} \text{ – коэффициент несинусоидальности напряжения} \quad (9)$$

в точке соединения преобразователя, сети и ФКУ,

$$P \text{ – потери в ФКУ.} \quad (10)$$

Будем считать, что известны зависимости:

$$P = f(\mathbf{X}), \quad (11)$$

$$K_{HH} = f_2(\mathbf{X}). \quad (12)$$

Требуется минимизировать (11) при ограничениях:

$$\mathbf{G} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{H}, \quad (13)$$

$$0 \leq f_2(\mathbf{X}) \leq K_{HH \text{ доп}}, \quad (14)$$

$$f_1(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n x_i = Q. \quad (15)$$

Уравнение (14) является функциональным ограничением на выходные параметры, где  $K_{HH \text{ доп}}$  – допустимое значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, а уравнение (15) – прямым функциональным ограничением на внутренние управляемые параметры. Физический смысл этого ограничения состоит в том, что независимо от варианта распределения реактивной мощности ФКУ между фильтрами суммарная реактивная мощность всех фильтров должна оставаться неизменной, то есть *тождественно* равной реактивной мощности ФКУ. Варианты, которые не соответствуют этому условию, считаются недопустимыми и в решении задачи не участвуют.

Система параметров, уравнений и неравенств (1) – (15) образует формальную математическую постановку задачи оптимального проектирования ФКУ.

Вектор  $\mathbf{X}^* = [x_1^*, \dots, x_i^*, \dots, x_n^*]^T$ , удовлетворяющий соотношениям (13) – (15), называется *оптимальной точкой*, а соответствующее значение  $P_{\min} =$

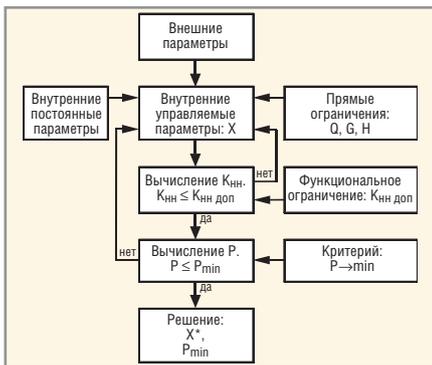


Рис. 1. Функциональная схема постановки задачи оптимального проектирования ФКУ и алгоритма решения

$= f(\mathbf{X}^*)$  – оптимальным значением целевой функции.

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

Функциональная схема постановки и решения задачи оптимального проектирования ФКУ показана на рис. 1.

Операции алгоритма решения выполняются в следующей последовательности:

- 1) производится подготовка задачи, то есть вводятся значения всех постоянных параметров и ограничений;
- 2) задаётся первая итерация вектора  $\mathbf{X}$ ;
- 3) вычисляется значение  $K_{\text{нн}}$  и сравнивается с величиной функционального ограничения  $K_{\text{нн доп}}$ ;
- 4) если  $K_{\text{нн}} > K_{\text{нн доп}}$  то данная итерация отвергается и задаётся следующая итерация вектора  $\mathbf{X}$ ;
- 5) если  $K_{\text{нн}} \leq K_{\text{нн доп}}$  то производится вычисление значения целевой функции  $P$  и её оценка на минимальность;
- 6) если  $P$  квалифицируется как минимум, то решение считается найденным;
- 7) если  $P \neq P_{\min}$ , то берётся следующая итерация  $\mathbf{X}$ , и процедура расчёта повторяется.

Для разработки программы на основе рассмотренного алгоритма необходимо иметь уравнения, позволяющие непосредственно рассчитывать значения функции ограничений  $K_{\text{нн}} = f_2(\mathbf{X})$  и целевой функции  $P = f(\mathbf{X})$

в зависимости от величины координат вектора  $\mathbf{X}$  [4].

### ВЫБОР МЕТОДИЧЕСКОГО НАПРАВЛЕНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача синтеза параметров ФКУ имеет множество решений. Целью оптимизации в соответствии с избранным критерием – минимизацией потерь в схеме ФКУ – является нахождение наилучшего решения, удовлетворяющего условиям задачи.

Согласно постановке задачи, в качестве оптимальных параметров ФКУ квалифицируется определённый набор ёмкостей, индуктивностей и резисторов схемы ФКУ, который обеспечивает необходимую синусоидальность напряжения в точке общего соединения сети, преобразователя и ФКУ и компенсирует реактивную мощность преобразователя до заданного уровня при минимальном потреблении активной мощности.

Оптимизационные задачи, которые можно описать системой уравнений, равенств и неравенств, решаются методами математического программирования [5, 6].

При параметрическом синтезе ФКУ согласно постановке задачи определены *не границы изменения каждой координаты, а сумма координат*, которая должна оставаться постоянной на всём пути поиска экстремума независимо от значений координат, поскольку координаты (в физической интерпретации) – это реактивные мощности фильтров ФКУ, а их сумма – это реактивная мощность ФКУ, заданная из условия обеспечения необходимой степени компенсации реактивной мощности преобразователя в точке его присоединения к сети. Значения координат, то есть реактивные мощности фильтров, меняются от итерации к итерации в процессе поиска. Имеются два критерия отказа от комбинации координат анализируемого варианта ФКУ и перехода к следующему варианту: во-первых, если данная комбинация координат не обеспечивает требуемой синусоидальности напряжения в точке соединения преобразователя с сетью, то есть не выполняется функциональное ограничение задачи типа неравенства, и во-вторых, если потери в ФКУ не минимальны, то есть экстремум ещё не достигнут. Приемлемость новой комбинации координат, то есть квалификация варианта как допустимого или

оптимального, оценивается по тем же признакам; при этом суммы координат вектора переменных в отвергнутом и новом анализируемом вариантах должны быть равными. Последнее требование должно удовлетворяться *тождественно* на всём пути поиска при любых допустимых комбинациях координат и является *априорным необходимым условием* квалификации варианта ФКУ на допустимость.

В задачах условной оптимизации нелинейного типа наиболее сложным вопросом является организация процедуры поиска на всём пространстве определения функции, чтобы иметь возможность отыскать максимальное число локальных экстремумов и выбрать из них глобальный оптимум. Такие возможности предоставляет технология случайного поиска координат исследуемой функции на основе ряда псевдослучайных чисел [5], равномерно распределённых на интервале (0, 1).

Однако для задачи оптимального параметрического синтеза ФКУ непосредственное использование данной технологии невозможно, так как нет убедительных оснований для априорного ограничения диапазона вариации каждой координаты. Единственное аргументированное ограничение на координаты – это тождественность суммы координат на всех шагах поиска.

Если предположить, что каждая координата может варьироваться на интервале от нуля до значения реактивной мощности ФКУ, что по физическим соображениям вполне обосновано, то выполнение условия тождественности суммы координат на всём пути поиска окажется маловероятным. Так как значение каждой координаты вычисляется по закону равномерного распределения псевдослучайных чисел, то и сумма координат является псевдослучайным числом.

Чтобы преодолеть объективное противоречие между очевидным достоинством технологии случайного поиска координат вершин исходного многогранника и жёстким ограничением на сумму координат типа тождества, автором настоящей работы предложен *специальный алгоритм случайного поиска координат*, который предусматривает *автоматическое выполнение ограничения типа тождества на сумму координат*. Алгоритм базируется на *процедуре формирования вектора верхних границ ко-*

ординат  $\mathbf{H}$ , суть которой состоит в том, что координаты вектора  $\mathbf{H}$  не задаются в исходных данных задачи, а формируются в процессе вычисления в функции с учётом информации о результатах предшествующей итерации.

На основе данного алгоритма, названного алгоритмом тождественного случайного поиска (ТОП-алгоритм), разработан метод решения задач нелинейного программирования, в которых наряду с функциональными ограничениями типа неравенств имеется ограничение на сумму координат типа тождества.

Алгоритм развивает идеи нахождения экстремума многокоординатных функций, которые используются в методе поиска по деформируемому многограннику и в комплексном методе [5]. Принципиальное отличие ТОП-метода от указанных состоит в том, что ограничение типа тождества на сумму координат выполняется на всех этапах поиска оптимума целевой функции: формирования координат исходной вершины многогранника; формирования векторов вершин исходного многогранника; движения многогранника к экстремуму.

На базе алгоритмов ТОП-метода разработан программный комплект ТОПМЕТ, предназначенный для параметрической оптимизации фильтрокомпенсирующих устройств. Комплект содержит головную программу и семь подпрограмм, выполняющих следующие процедуры:

- формирование вектора первой вершины многогранника;
- формирование исходного многогранника;
- движение многогранника к экстремуму;
- вычисление значений функции ограничений;
- вычисление значений целевой функции;
- вычисление коэффициентов, используемых в расчётах;
- оценка решения на оптимум и остановка задачи.

Предусмотрена возможность работы программного комплекта в режимах поиска как локального, так и глобального экстремумов.

Во второй части статьи рассматривается алгоритм ТОП-метода и принципы построения программного комплекта ТОПМЕТ.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Тех. регламент «Об электромагнитной совместимости». Технологии электромагнитной совместимости. 2004. № 1 (8).
2. Добрусин Л.А. Статические фильтрокомпенсирующие устройства. Автоматизированный электропривод, силовые полупроводниковые приборы, преобразовательная техника. Москва: Энергоатомиздат, 1983.
3. Добрусин Л.А. Проектирование фильтрокомпенсирующих устройств. Улучшение электромагнитной совместимости электрических полупроводниковых преобразователей как средство экономии материальных и энергетических ресурсов. Москва: ВНИПИ ТПЭП, 1986.
4. Добрусин Л.А., Джафаров З.Г. Комплексный метод и его применение при проектировании фильтрокомпенсирующих структур. Электричество, 1986, № 8.
5. Химмельблауд Д. Прикладное нелинейное программирование. Москва: Мир, 1975.
6. Уайльд Д. Оптимальное проектирование. Перевод с английского. Москва: Мир, 1981.
7. Добрусин Л.А. Программный комплект параметрической оптимизации фильтрокомпенсирующих структур. Электротехника 2010, IV симпозиум, том 1, часть 1. Москва: ВЭИ ТРАВЭК, 1997.

Продолжение следует.



**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ  
ЭЛЕКТРОНИКА. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА – 2005**

**IV межрегиональная специализированная выставка**



**6 - 9 ДЕКАБРЯ 2005**

**ОРГАНИЗАТОРЫ:**

- Комитет по промышленности, науке и информационным технологиям Администрации города Екатеринбурга
- КОСК «Россия» Выставочный центр

**РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:**

- Передовые технологии, оборудование, материалы
- Датчики, системы идентификации, первичные преобразователи, электроприводы
- Контрольно-измерительные и диагностические приборы
- Электронные устройства, компоненты, элементная база
- Силовая электроника и микроэлектроника
- Метрология, весоизмерительное оборудование
- Электротехническое оборудование общепромышленного применения
- Специализированная литература

**В ПРОГРАММЕ:**

- Научно-техническая конференция
- Презентации передовых отечественных и зарубежных компаний, семинары, консультации, конкурсы

Выставка «Приборостроение. Электроника. Электротехника – 2005» проводится одновременно с выставкой «Передовые технологии автоматизации – Урал» (организатор ЗАО «Экспотроника», г. Москва).

**Место проведения:**

КОСК «Россия» г. Екатеринбург, ул. Высоцкого, 14

Тел./факс (343)345-45-05, 347-18-32  
e-mail: vystavka@kosk.ru, www.kosk.ru

**Время работы:**

6-8 декабря с 10.00 -18.00  
9 декабря с 10.00 -14.00