

Транзисторный компенсатор

реактивной мощности

В разработанном компенсаторе реактивной мощности использованы силовые IGBT-модули фирмы Mitsubishi. Показано, что выбор силовых транзисторов производится по максимальному напряжению между коллектором и эмиттером и номинальному току через IGBT. Доказана возможность применения силовых модулей других производителей, имеющих идентичные основные параметры, как у IGBT-модулей Mitsubishi.

Валентин Приходько,
к. т. н., профессор

prihodki-3@yandex.ru

Марк Ивлев, к. т. н., доцент
Ирина Приходько

Статические компенсаторы реактивной мощности

В рыночных экономических условиях необходимо внедрение компенсирующих устройств в целях уменьшения потерь электроэнергии при ее транспортировании, повышения надежности электроснабжения, увеличения пропускной способности межсистемных связей.

До создания статических тиристорных компенсаторов для регулирования напряжений, повышения статической и динамической устойчивости сетей, снижения перенапряжений использовали синхронные компенсаторы или коммутируемые батареи конденсаторов и реакторы. Установка шунтовых реакторов и конденсаторов в электрической сети способствовала улучшению реактивных параметров сети, но не обеспечивала быстрого и непрерывного регулирования реактивной мощности (РМ). Замена этих устройств статическими компенсаторами, получившими широкое распространение за рубежом, была вызвана необходимостью обеспечения требуемых параметров энергосистемы, надежности и ремонтнопригодности оборудования.

В современных системах электроснабжения все большее значение приобретают устройства компенсации РМ, позволяющие непрерывно поддерживать необходимый баланс РМ. Устройствами, отвечающими высоким требованиям по быстродействию и плавности регулирования, являются статические компенсаторы реактивной мощности (КРМ). Статические тиристорные компенсаторы находят все большее применение в электроэнергетических системах для регулирования напряжения в узлах нагрузки [1]. Актуальность создания надежного и эффективного управляемого статического источника реактивной мощности (ИРМ) очевидна [2]. Определению оптимальных параметров статического тиристорного компенсатора посвящена статья [3]. Однако в статическом тиристорном компенсаторе [3] номинальное напряжение тиристорного коммутатора должно приниматься равным номинальному напряжению шин

подстанции [4], к которым подключен статический тиристорный компенсатор.

Автором [1] в предложенной схеме регулируемого ИРМ используется схема регулируемой части статического тиристорного компенсатора [4], однако номинальное напряжение тиристорного коммутатора в ИРМ может быть принято в несколько раз ниже, чем в статическом тиристорном компенсаторе. Для обоснования особенностей выбора параметров оборудования ИРМ проведен сравнительный анализ параметров установившихся режимов регулируемых ИРМ и статических тиристорных компенсаторов [1], получены зависимости от угла отпирания тиристорных α . Определены диапазоны регулирования выдаваемой реактивной мощности ИРМ 35, 110 и 220 кВ. Возможно многофункциональное использование в энергосистемах статических тиристорных КРМ, и, в частности, для снижения коммутационных перенапряжений на воздушных линиях электропередачи [5]. Построение электрических схем статических тиристорных КРМ и их оптимизация должны проводиться с учетом требований по снижению коммутационных перенапряжений, если такая задача ставится в конкретных случаях использования статического тиристорного компенсатора в энергосистеме. Вопросы применения статических тиристорных КРМ для снижения коммутационных перенапряжений исследовались в [5].

Для улучшения динамических свойств статических тиристорных КРМ с фильтрокомпенсирующими цепями требуется надежный аппарат, осуществляющий их коммутацию при интенсивных переходных процессах. В качестве коммутационного аппарата могут использоваться тиристорные коммутаторы, что приведет к некоторому увеличению стоимости статических тиристорных КРМ. Работа потребителей, содержащих в своем составе нелинейную нагрузку, сопровождается искажением формы кривой тока и напряжения, нормируемых согласно ГОСТ 13109-87, по коэффициенту несинусоидальности напряжения $k_{НС}$. Эти искажения отрицательно влияют на режим работы сети и потребителя, вызывая до-

полнительные потери мощности и электро-энергии в питающих линиях и оборудовании, резонансы токов и напряжений, сбой в работе ПЭВМ, автоматики и др.

При работе автономных (судовых, корабельных, сельскохозяйственных) электро-энергетических систем, содержащих мощную преобразовательную нагрузку, такие отрицательные последствия приобретают особое значение [6–8]. С целью компенсации высших гармонических и контроля качества напряжения в автономных электроэнергетических системах необходимо:

- при проектировании расчетным путем определить амплитуды и фазы высших гармоник и коэффициент несинусоидальности в отдельных узлах сети;
- при эксплуатации проводить измерения гармонического состава тока, напряжения и коэффициента несинусоидальности в этих же узлах.

На основе этих данных вырабатываются практические рекомендации по выбору схемы и параметров средств компенсации высших гармонических с учетом оптимизации массогабаритных показателей выбранного оборудования (например, фильтра высших гармоник). Решение этой задачи усложняется тем, что масса и габариты применяемого оборудования изменяются дискретно. Оптимальное решение может быть получено только с помощью САПР, позволяющей обрабатывать большое количество вариантов, в том числе нестандартных. Это качество может быть обеспечено путем модульного построения информационных, программных и технических средств таких систем.

Однофазный вентильно-конденсаторный ИРМ с частотным регулированием [9] в ряде случаев может быть использован для компенсации не только индуктивной составляющей тока нелинейной нагрузки, но и одной из нечетных гармоник этого тока. Быстродействие таких компенсаторов равно половине периода напряжения сети (как и резонансных фильтров, снабженных мостовыми тиристорными выключателями). Для генерирования в сеть нечетной гармоники тока регулируемой фазы необходимо:

- частоту импульсов управления тиристорными коммутаторами установить равной удвоенной частоте сети;
- фазу импульсов управления сделать регулируемой;
- емкость конденсатора и индуктивность входного реактора вентильно-конденсаторного ИРМ выбрать из условия резонанса (с учетом индуктивности сети) на частоте v -й гармоники тока нелинейной нагрузки.

Амплитуды основной и высшей гармоник сетевого тока вентильно-конденсаторного ИРМ постоянны и не зависят от изменения фазы импульсов управления тиристорными коммутаторами. Амплитуда высшей гармоники сетевого тока вентильно-конденсаторного ИРМ в v раз больше амплитуды его основной гармоники [9].

Наиболее оптимальным является использование вентильно-конденсаторных ИРМ в сетях

со «спокойными» или периодически включае-мыми нелинейными нагрузками, в которых амплитуды основной и высших гармоник потребляемого тока постоянны по величине или изменяются в незначительных пределах.

IGBT КРМ дискретного типа (КРМ ДТ)

Силовая часть компенсатора состоит из четырех секций конденсаторных батарей (КБ 1, КБ 2, КБ 3, КБ 4) с соотношением мощностей 1:2:4:8, при этом конденсаторы каждой секции включены треугольником. Каждая из секций конденсаторов подключается к сети посредством последовательно соединенных с ними бесконтактных коммутаторов, выполненных на основе IGBT (ТК1, ТК2, ТК3, ТК4). Такая организация силовой части КРМ позволяет, во-первых, значительно сократить количество коммутационно-защитной аппаратуры, во-вторых, обеспечить 15 (с нулевым уровнем — 16) ступеней регулирования РМ компенсатора, обеспечивая достаточно плавное изменение мощности при широком диапазоне регулирования.

Важнейшей особенностью предлагаемого КРМ по сравнению с применяемыми в настоящее время устройствами является то, что с целью исключения бросков тока в КБ при коммутациях подключение конденсаторов к сети происходит не в произвольный момент времени, а в момент равенства мгновенного напряжения сети и остаточного напряжения на конденсаторах.

Силовая часть компенсатора состоит из четырех секций КБ, мощности которых относятся друг к другу как 1:2:4:8. Такое построение силовой схемы статического транзисторного коммутатора (СТК) позволяет сократить количество коммутационной аппаратуры при достаточно широком диапазоне регулирования мощности КБ [10].

Поскольку полная РМ проектируемой установки составляет 600 кВАр, мощность одной ступени регулирования определяется следующим образом:

$$\Delta Q = 600/15 = 40 \text{ кВАр.}$$

Мощности первой, второй, третьей и четвертой секций конденсаторной батареи соответственно равны:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 40 \text{ кВАр;} \\ Q_2 &= 80 \text{ кВАр;} \\ Q_3 &= 160 \text{ кВАр;} \\ Q_4 &= 320 \text{ кВАр.} \end{aligned}$$

Суммарная емкость конденсаторов одной секции конденсаторной батареи определяется из выражения [10]:

$$Q = \omega C U^2.$$

Отсюда получаем соответственно:

$$C_1 = \frac{Q}{\omega U^2} = \frac{40 \times 10^3}{2 \pi \times 50 \times 380^2} \approx 882 \text{ мкФ};$$

$$C_2 = 1764 \text{ мкФ};$$

$$C_3 = 3528 \text{ мкФ};$$

$$C_4 = 7056 \text{ мкФ}.$$

Таким образом, емкости конденсаторов, подключенных в каждую фазу одной секции соответствующих ступеней, будут равны:

$$\begin{aligned} C_{\text{ав1}} &= C_{\text{вс1}} = C_{\text{сa1}} = 294 \text{ мкФ}; \\ C_{\text{AB2}} &= C_{\text{BC2}} = C_{\text{CA2}} = 588 \text{ мкФ}; \\ C_{\text{AB3}} &= C_{\text{BC3}} = C_{\text{CA3}} = 1176 \text{ мкФ}; \\ C_{\text{AB4}} &= C_{\text{BC4}} = C_{\text{CA4}} = 2352 \text{ мкФ}. \end{aligned}$$

Фазные токи секций батарей конденсаторов определим как:

$$\begin{aligned} I_{\phi} &= \frac{U}{X_c} = U \times \omega \times C; \\ I_{\phi 1} &= 380 \times 314 \times 294 \times 10^{-6} = 35,1 \text{ А}; \\ I_{\phi 2} &= 70,2 \text{ А}; \\ I_{\phi 3} &= 140,4 \text{ А}; \\ I_{\phi 4} &= 280,8 \text{ А}. \end{aligned}$$

Тогда линейные токи каждой из секций будут равны:

$$\begin{aligned} I_{\text{Л1}} &= \sqrt{3} \times I_{\phi 1} = 60,8 \text{ А}; \\ I_{\text{Л2}} &= 121,6 \text{ А}; \\ I_{\text{Л3}} &= 243,2 \text{ А}; \\ I_{\text{Л4}} &= 486,4 \text{ А}. \end{aligned}$$

На основании приведенных выше расчетов целесообразно применить косинусные конденсаторы марки КЭС1-0,66-40-2У1. Емкость одного такого конденсатора $C = 292$ мкФ. Таким образом, в каждой фазе первой секции содержится по одному конденсатору, второй секции — по два параллельно соединенных конденсатора, третьей секции — по четыре, четвертой секции — по восемь.

Для коммутации батарей конденсаторов предлагается применять вместо тиристорных IGBT. Управление транзисторными ключами существенно отличается от управления тиристорами. Транзистор является полностью управляемым ключом, его можно открывать и закрывать в любые моменты времени, поэтому система управления должна быть точно синхронизирована с сетью и выдавать команды ключу не только на включение, но и на выключение [10].

IGBT обладают достаточно малым временем переключения. Это позволяет с высокой точностью переключать транзисторы в моменты перехода тока конденсаторов через ноль, а также включать транзисторные ключи в момент времени, когда мгновенное значение напряжения питающей сети и остаточное напряжение на конденсаторе будут равны по величине. Последнее условие, как указывалось выше, позволяет избежать возникновения переходных процессов в КБ при ее подключении к сети.

Выбор силовых транзисторов производится по максимальному напряжению между коллектором и эмиттером и номинальному току через транзистор. Амплитуда напряжения между коллектором и эмиттером на закрытом IGBT может достигать значения:

$$U_{\text{Тн}} = 2 \times U_a = 2 \times \sqrt{2} \times U = 2 \times \sqrt{2} \times 380 = 1075 \text{ В}$$

Таблица 1. Параметры применяемых IGBT-модулей

| Тип модуля | U _{кзм} , В | I _{кзм} , А | U _{зз} , В | U _{кз0} , В | C _{вх} , нФ | Q _{вх} , нК | t _{вкл} , нс | t _{выкл} , нс | I _{вх,у} , мкА | I _{кз,т} , мА |
|-------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| CM400DU-24F | | 400 | | 1,8 | 160 | 4400 | 650 | 1300 | 80 | 2 |
| CM200DU-24H | 1200 | 200 | ±20 | 2,4 | 60 | 1400 | 550 | 850 | 2 | 2 |
| CM100DU-24H | | 100 | | 2,5 | 16 | 400 | 450 | 650 | 0,5 | 1 |
| CM50DU-24H | | 50 | | 2,3 | 8,2 | 200 | 450 | 600 | 0,5 | 1 |

Это возможно, если конденсатор был заряжен до амплитудного значения напряжения сети. Таким образом, транзистор должен поддерживать эту разность потенциалов с некоторым запасом.

В рассматриваемом КРМ предлагается использовать силовые IGBT-модули фирмы Mitsubishi. Однако это не исключает возможности использования силовых модулей других производителей, имеющих такие же основные параметры, как приведенные ниже для IGBT-модулей Mitsubishi. Каждый модуль содержит два IGBT (коллектор одного из транзисторов соединен с эмиттером другого) и два защитных диода, включенных между эмиттером и коллектором транзисторов, т. е. в одном модуле расположены все компоненты для построения транзисторного ключа.

Для коммутации четвертой, самой мощной секции используется модуль CM400DU-24F со следующими параметрами:

- максимальное напряжение коллектор-эмиттер U_{кзм} = 1200 В;
- постоянный ток через коллектор-эмиттер I_{кзм} = 400 А;
- управляющее напряжение U_{зз} = ± 20 В;
- типовое падение напряжения на открытом транзисторе U_{кз0} = 1,8 В;
- входная емкость модуля C_{вх} = 160 нФ;
- эквивалентный входной заряд Q_{вх} = 4400 нК;
- максимальное время включения t_{вкл} = 650 нс;
- максимальное время выключения t_{выкл} = 1300 нс;
- максимальный входной ток утечки I_{вх,у} = 80 мкА;
- максимальный ток через закрытый транзистор I_{кз,т} = 2 мА.

Для коммутации третьей секции подходит модуль CM200DU-24H, для коммутации второй секции — модуль CM100DU-24H, для первой — CM50DU-24H. Основные параметры выбранных IGBT-модулей представлены в таблице 1.

Резонансные явления и компенсация гармоник конденсатором на IGBT

На практике проверка возможности резонансных явлений в электроэнергосистеме энергоблока, электроэнергетическая система (ЭЭС) которого включает шесть трансформаторов типа ТМ-730, три эквивалентных двенадцатифазных преобразователя ВАКЗС-500-330, а также КБ суммарной мощностью 200 кВАр, показала, что при работе двух синхронных генераторов (СГ), тиристорных преобразователей и КБ в системе возможен резонанс на 7-й гармонике.

Экспериментальные исследования, проведенные на энергоблоке, показали значительное резонансное усиление некомпенсированных 5-й и 7-й гармоник (до 10%) в контуре СГ-КБ, что согласуется с теорией [11].

Частотные характеристики и выбор параметров конденсатора на IGBT

Проблема выбора параметров КРМ ДТ не ограничивается только определением величины максимальной (суммарной) емкости секции КБ, исходя из величины РМ нагрузки, подключенной к рассматриваемому узлу питающей сети (шинам низкого напряжения трансформаторной подстанции). При выборе емкости следует также принимать во внимание частотные характеристики узла питающей сети во избежание возможности возникновения нежелательных, с точки зрения эксплуатационной надежности и устойчивости системы, резонансных режимов в контурах, образуемых емкостью КРМ ДТ и индуктивностями иных элементов системы.

Однолинейная схема замещения условно-типичной системы электроснабжения (цеховой подстанции), включающей в себя КРМ

ДТ, приведена на рис. 1. На схеме выделены: питающий трансформатор Тр, асинхронная нагрузка АД₁... АД_n, обобщенная нагрузка X_R (в том числе нелинейная — полупроводниковый преобразователь ТПр) и КРМ ДТ, состоящий из четырех секций КБ.

Величины РМ, сопротивления и проводимости КБ определяются известными соотношениями [12, 13]:

$$Q_{КБ} = I^2 \times x_c = U^2 \times b_c;$$

$$x_{КБ} = \frac{Q_{КБ}}{I^2} = \frac{1}{\omega \times C_{КБ}};$$

$$b_{КБ} = \frac{Q_{КБ}}{U^2} = \omega \times C_{КБ};$$

$$x_{КБ} = \frac{1}{b_{КБ}} = \frac{3 \times U_{\text{фн}}^2}{Q_{КБ}}.$$

Емкость КБ определяется по выражению:

$$C_{КБ} = \frac{Q_{КБ}}{3 \times \omega \times U_{\text{фн}}^2}$$

Анализ схемы проведем, используя схему замещения для первой гармоники (рис. 2).

Параметры КБ должны быть выбраны таким образом, чтобы реактивные сопротивления КБ

$$x_{КБ \text{ max}} = \frac{1}{\omega \times C_{\text{min}}}$$

и

$$x_{КБ \text{ min}} = \frac{1}{\omega \times C_{\text{max}}}$$

не создавали резонанса с реактивным сопротивлением питающего трансформатора на частоте основной гармоники.

Суммарную емкость КБ можно определить как сумму k членов геометрической прогрессии

$$C_{\Sigma} = \frac{C_n \times k - C_1}{k - 1}$$

где: C_n=C₁×2ⁿ⁻¹ — емкость n-ой ступени КБ; C₁— емкость первого члена геометрической прогрессии; 2 — знаменатель прогрессии; n — номер взятого члена.

Последнее выражение можно записать иначе:

$$C_{\Sigma \text{ max}} = 2^0 C_1 + 2^1 C_1 + 2^2 C_1 + 2^3 C_1 = 15 C_1. \quad (1)$$

С учетом дискретного способа включения КБ, уравнение (1) можно переписать следующим образом:

$$C_{\Sigma \text{ max}} = [A(1)2^0 C_1 + A(2)2^1 C_1 + A(3)2^2 C_1 + A(4)2^3 C_1] - A(5), \quad (2)$$

где A(1)... A(5) — коммутационные функции, принимающие одно из двух фиксированных значений («0» или «1»), которые определяются алгоритмом работы и уставкой системы управления КРМ ДТ.

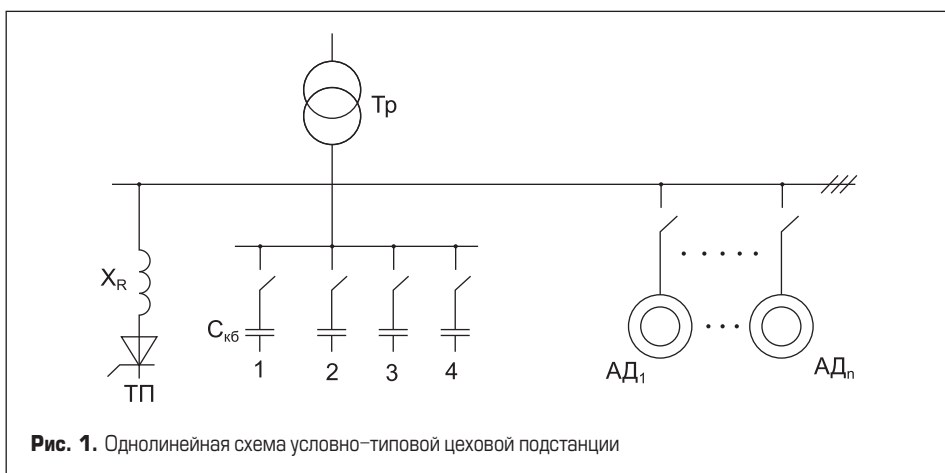


Рис. 1. Однолинейная схема условно-типичной цеховой подстанции

Для идеального параллельного контура индуктивность трансформатора — емкость КБ собственная резонансная частота (ω_0) определяется как

$$\omega_{0r} = \frac{1}{\sqrt{L_{TP} \times C_{KB}}}$$

А поскольку, в соответствии с (1) и (2), емкость КБ может изменяться в пределах $C_1 \leq C_{KB} \leq 15C_1$, то собственная резонансная частота узла питающей сети будет изменяться в пределах $\min \omega_{0Tmax} \leq \omega_{0T} \leq \omega_0$, причем частота ω_{0Tmax} соответствует емкости C_1 , а ω_0 — емкости $15C_1$.

Из анализа АЧХ параллельного колебательного контура (рис. 3) [13] следует, что в диапазоне частот от 0 до ω_{0T} параллельный контур обладает индуктивной реакцией, а после ω_{0T} — емкостной реакцией.

При полной компенсации РМ в сети имеет место резонанс ($\cos\phi = 1$), что нежелательно из-за сверхтоков в трансформаторе и КБ.

Из анализа АЧХ следует, что рабочая частота параллельного контура $\omega = 2\pi f = 314$ рад/с

должна лежать в диапазоне $0 < \omega < \omega_{0T}$, причем, так как ω_{0T} при переключении КБ изменяется в определенном диапазоне $\omega_{0Tmax} \leq \omega_{0T} \leq \omega_0$, то выбор емкости КБ необходимо проводить, исходя из условия, что \min

$$\omega < \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{TP} \times C_{KB}}}$$

Выводы

Рассмотрены особенности резонансных явлений в электроэнергетических системах питания судов (кораблей) с берега с мощными полупроводниковыми преобразователями, вызванных высшими гармониками тока и напряжения, появляющимися в ЭЭС в результате работы мощных полупроводниковых преобразователей. Определены соотношения, позволяющие производить детерминированную оценку возможности возникновения в ЭЭС резонансных режимов. Проведена практическая проверка установленных зависимостей, подтверждающая полученные теоретические выводы.

Литература

Представлены частотные характеристики условно-типовой системы электроснабжения, содержащей КРМ ДТ на IGBT, что необходимо для правильного выбора параметров транзисторного компенсатора во избежание возможности возникновения нежелательных, с точки зрения эксплуатационной надежности и устойчивости системы, резонансных режимов в контурах, образуемых емкостью КРМ ДТ и индуктивностями иных элементов системы.

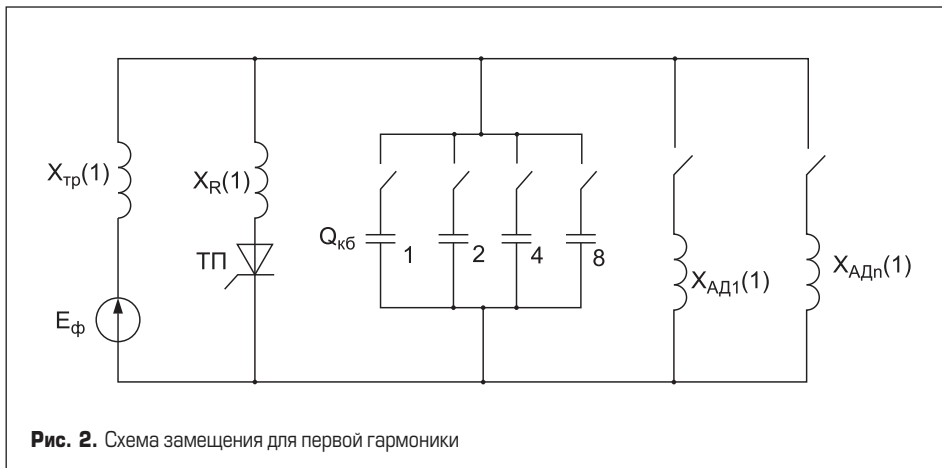


Рис. 2. Схема замещения для первой гармоники

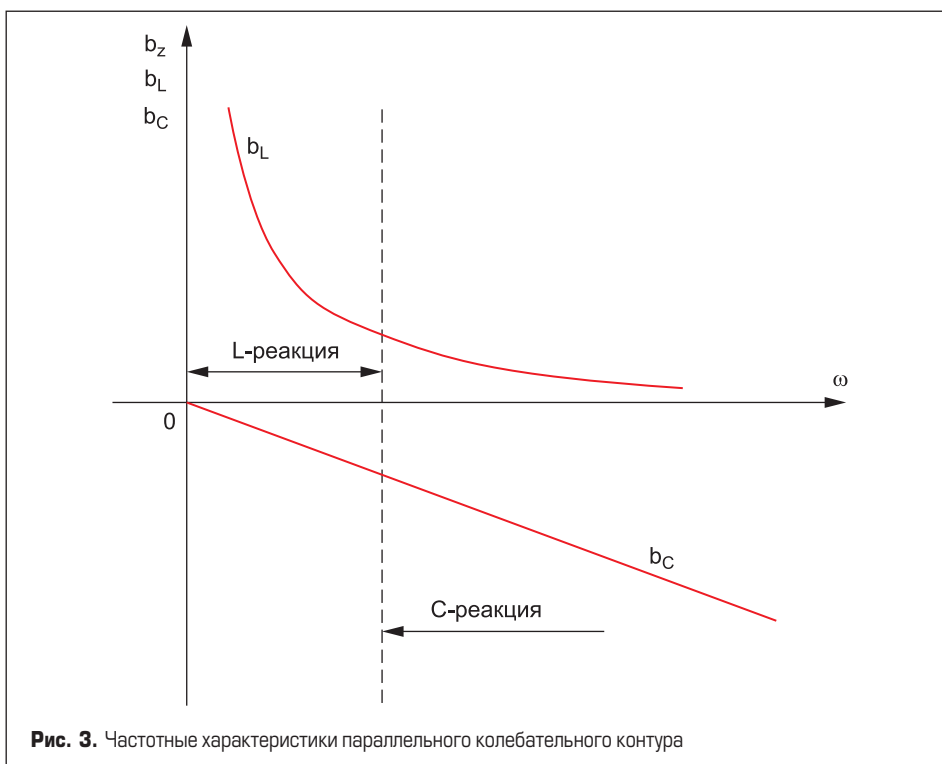


Рис. 3. Частотные характеристики параллельного колебательного контура

1. Сидоров В. С. Сравнительный анализ параметров установившихся режимов регулируемых источников реактивной мощности и статических тиристорных компенсаторов // Известия вузов. Энергетика. 1990. № 10.
2. Черников Г. Б. Управляемый статический источник реактивной мощности // Электричество. 1981. № 10.
3. Азарьева Е. Д. Определение оптимальных параметров статического тиристорного компенсатора // Электричество. 1988. № 7.
4. Азарьев Д. И. Статический тиристорный компенсатор на подстанции 500 кВ «Луч» // Электрические станции. 1985. № 9.
5. Ильиничин В. В. Применение тиристорных компенсаторов для снижения коммутационных перенапряжений в линиях электропередачи // Электрические станции. 1990. № 1.
6. Приходько В. М. Техничко-экономический анализ судовых электроэнергетических систем с полупроводниковыми преобразователями. Юбилейная XV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2016)». 26–28 октября 2016. Материалы конференции. СПб.: РАН, 2016.
7. Приходько В. М. Особенности технико-экономического анализа судовых электроэнергетических систем с мощными преобразовательными устройствами // Речной транспорт (XXI век). 2016. № 3.
8. Приходько В. М. Проектирование судовых электроприводов переменного тока с преобразователями частоты. СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013.
9. Федий В. С. Вентильный компенсатор индуктивного тока и нечетной гармоники на основе резонансного фильтра // Техническая электродинамика. 1990. № 6.
10. Приходько В. М. Эффективность компенсатора реактивной мощности дискретного типа // Журнал университета водных коммуникаций. СПб.: СПГУВК, 2012. Вып. III (XV).
11. Приходько В. М. Резонансные явления в электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями при питании судов с берега // Журнал университета водных коммуникаций. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2013. Вып. III (XIX).
12. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1996.
13. Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. Часть вторая. Теория цепей переменного тока. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1959.