

УДК 621.314

В.П. Кириенко¹, В.В. Ваняев¹, Е.А. Копелович²**ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРОВ
В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Института прикладной физики РАН (Н. Новгород)²

Рассмотрены особенности режимов работы конденсаторов в АС/DC преобразователях электрофизических установок. Предложены методика расчета допустимых режимов конденсаторов с применением имитационных моделей преобразователей и методика их выбора с использованием аналитической взаимосвязи параметров, полученной на основе паспортных данных.

Ключевые слова: конденсатор, преобразователь, электрофизическая установка, имитационные модели, методика выбора, допустимые режимы.

Последние десятилетия характеризуются широким использованием в различных областях науки и техники мощных и сверхмощных электрофизических установок (ЭФУ) [1]. К ним относятся генераторы и усилители когерентного электромагнитного излучения. По уровню выходной мощности несомненное лидерство среди таких ЭФУ принадлежит СВЧ установкам и лазерным комплексам, первые из которых позволяют получать излучение мощностью порядка 1 МВт (10^6 Вт) в непрерывном режиме, а вторые – до 1 ПВт (10^{15} Вт) в моноимпульсном режиме.

Наиболее мощные СВЧ-установки построены на гирорезонансных приборах (гиротронах, гироклистронах и др.) или приборах магнетронного типа (магнетронах и др.). Современные мощные лазерные комплексы выполняются на базе газовых или твердотельных лазеров. Для мощных СВЧ и лазерных установок необходимы высоковольтные источники питания (ВВИП), концепция построения которых изложена в [1].

Исходя из анализа требований, приведенных в [1], ВВИП мощных ЭФУ могут быть выполнены на базе трех структурных схем:

- с прямой передачей энергии в нагрузку через высоковольтный АС/DC преобразователь с фильтром;
- с передачей энергии в нагрузку через высоковольтный АС/DC преобразователь и коммутатор;
- с передачей энергии в нагрузку от промежуточного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) через коммутатор. В этом случае АС/DC преобразователь выполняет функцию зарядного устройства (ЗУ) ЕНЭ.

Одним из наиболее перспективных являются ЗУ, построенные на базе полупроводниково-конденсаторных преобразователей. Они имеют простую силовую схему, обеспечивают параметрическую стабилизацию выходных параметров (тока или мощности) и естественное токоограничение в аварийных режимах.

В процессе функционирования к конденсаторам, содержащимся в их силовых контурах, прикладывается несинусоидальное напряжение, изменяющееся в течение цикла зарядки, что не позволяет выбирать их тип и режим работы непосредственно по величине этого напряжения и его частоте [1, 2].

В подобных случаях исходят из того, что эксплуатационные режимы [3] не должны выходить за пределы допустимых значений:

- мощности частичных разрядов;

- мощности тепловыделения;
- амплитуды тока через конденсатор;
- действующего значения тока через конденсатор.

Данное обстоятельство ведет к необходимости определения этих пределов и факторов, влияющих на них.

Мощность частичных разрядов в диэлектрике зависит от приложенного напряжения. Для непропитанных конденсаторов или конденсаторов с вязкой пропиткой, у которых частичные разряды недопустимы, величина допустимого размаха переменного несинусоидального напряжения $U_{\text{пнд}}$ определяется из условия

$$U_{\text{пнд}} = U_{\text{псн}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{псн}}$ - наибольший допустимый размах синусоидального напряжения конденсатора, равный номинальному напряжению конденсатора $U_{\text{н}}$

$$U_{\text{псн}} = U_{\text{н}}. \quad (2)$$

Для конденсаторов с жидкой пропиткой, в случае равной длительности косинусоидальной формы фронта t_{ϕ} и спада несинусоидального напряжения, величину $U_{\text{пн}}$ рассчитывают по формуле

$$U_{\text{пнд}} = U_{\text{пс}} \sqrt[m]{\frac{f_{\text{с}}^n \tau_{\text{с}}}{f_{\text{н}} \tau_{\text{н}}} (2t_{\phi})^{n-1}}, \quad (3)$$

где $U_{\text{пс}}$, $f_{\text{с}}$, $\tau_{\text{с}}$ - размах (двойная амплитуда) напряжения несинусоидальной формы, его частота и срок службы конденсатора при этих условиях соответственно; $f_{\text{н}}$, $\tau_{\text{н}}$ - с частота несинусоидального напряжения и требуемый срок службы соответственно; m , n - показатели степени, определяемые типом диэлектрика ($n = 0,6 \dots 1,0$; $m = 4 \dots 6$ для пленочных диэлектриков).

Если конденсатор работает в области частот, где его напряжение ограничено допустимой мощностью тепловыделения, то ее величина $\Delta P_{\text{сд}}$ в установившемся режиме работы при синусоидальном напряжении может быть определена по формуле

$$\Delta P_{\text{сд}} = 0,5 C \omega U_{\text{мд}}^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (4)$$

где C , $\operatorname{tg} \delta$ - емкость конденсатора и тангенс угла потерь диэлектрика; ω - круговая частота приложенного напряжения; $U_{\text{мд}}$ - допустимая при заданной частоте амплитуда синусоидального напряжения, определяемая из графиков зависимости $U_{\text{мд}} = \varphi(f)$ для данного типа конденсатора.

Величина потерь мощности при несинусоидальном напряжении с косинусоидальным фронтом и спадом кривой в соответствии с [2] равна

$$\Delta P_{\text{н}} = 0,239 C \omega U_{\text{пн}}^2 \operatorname{tg} \delta \cdot \lg 1,8 \frac{T}{t_{\phi}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{пн}}$ - размах несинусоидального напряжения заданной формы; $T = 2\pi/\omega$ - период переменной, составляющей напряжения конденсатора.

Из выражений (4) и (5) при условии $\Delta P_{\text{н}} = \Delta P_{\text{сд}}$ определяют допустимый размах $U_{\text{пнд}}$ несинусоидального напряжения заданной формы, обеспечивающего такие же потери в конденсаторе, что и при синусоидальном напряжении:

$$U_{\text{пнд}} = U_{\text{мд}} \sqrt{\frac{1}{0,48 \lg 1,8 \frac{T}{t_{\phi 1}}}}. \quad (6)$$

Особенность стационарных режимов работы конденсаторов ЗУ в том, что они состоят из последовательности следующих друг за другом циклов, в пределах каждого из которых

величина размаха их напряжения $U_{\text{пн}}$ и длительность его фронта $t_{\text{ф}}$ (спада), в общем случае, являются функциями времени.

В подобных условиях представляется целесообразным ввести понятия эквивалентных синусоидальных напряжения $U_{mэ}$ и тока $I_э$, имеющих неизменную амплитуду и обеспечивающих такие же потери в конденсаторах при заданной рабочей частоте ЗУ, что и реальные несинусоидальное напряжение $U_{\text{пн}}(t)$ и действующее значение тока $I_{\text{н}}(t)$, мгновенные значения которых изменяются по величине и форме в течение цикла зарядки.

Величина потерь мощности в конденсаторе при напряжении $U_{\text{пн}}(t)$ равна среднему за цикл зарядки ЕНЭ значению потерь мощности, определяемому из выражения

$$\Delta P_{\text{нрц}} = \frac{1}{T_{\text{ц}}} \int_0^{T_{\text{ц}}} \Delta P_{\text{н}}(t) dt = 0,239 J C \omega \text{tg} \delta, \quad (7)$$

где J - интеграл, определяемый по формуле

$$J = \frac{1}{T_{\text{ц}}} \int_0^{T_{\text{ц}}} \left[U_{\text{пн}}^2(t) \cdot \lg 1,8 \frac{T}{t_{\text{ф}}(t)} \right] dt, \quad (8)$$

$T_{\text{ц}}$ - длительность цикла зарядки ЕНЭ.

Потери мощности при эквивалентном синусоидальном напряжении с амплитудой $U_{mэ}$ будут

$$\Delta P_э = 0,5 C \omega U_{mэ}^2 \text{tg} \delta. \quad (9)$$

Амплитуда эквивалентного синусоидального напряжения $U_{mэ}$, соответствующая равенству потерь $\Delta P_{\text{нрц}} = \Delta P_э$, определяется из выражения

$$U_{mэ} = \sqrt{0,48 \cdot J}. \quad (10)$$

В этом случае величина допустимого размаха эквивалентного синусоидального напряжения $U_{mэд}$ должна выбираться из равенства

$$U_{mэд} = U_{mд}. \quad (11)$$

Действующее значение эквивалентного синусоидального тока $I_э$, определяющее потери мощности в токоведущих частях конденсатора, рассчитывается как действующее за цикл зарядки ЕНЭ значение реального несинусоидального тока $i_{\text{н}}(t)$ в соответствии с выражением

$$I_э = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{ц}}} \int_0^{T_{\text{ц}}} i_{\text{н}}^2(t) dt}. \quad (12)$$

В установленном тепловом режиме работы ЗУ потери мощности в токоведущих частях конденсатора не должны превышать допустимого по условиям охлаждения значения, независимо от формы кривой тока. В качестве допустимого эквивалентного синусоидального тока $I_{эд}$ может быть выбрано наибольшее допустимое действующее значение синусоидального тока $I_{д}^{\text{max}}$, определяемого по частотным характеристикам данного типа конденсатора [1]

$$I_{эд} = I_{д}^{\text{max}}. \quad (13)$$

Интеграл J , величины $U_{mэ}$ и $I_э$ определяются численными методами при расчете электромагнитных процессов ЗУ в течение цикла зарядки накопительного конденсатора или в процессе имитационного моделирования, например, в среде *Matlab Simulink*.

При расчете допустимой амплитуды тока через конденсатор следует основываться на том, что потери энергии, выделяемые в металлических частях конденсатора при произволь-

ной форме импульса тока, протекающего через него, не должны превышать значение потерь, выделяемых в конденсаторе при протекании через него тока прямоугольной формы с известными параметрами, приводимыми в справочных данных [4].

Потери энергии при протекании импульса тока прямоугольной формы могут быть определены из выражения

$$W_1 = r I_{мп}^2 t_{и} = r \left(C \frac{du}{dt} \right)_{\max}^2 \cdot \frac{U_{н}}{\left(\frac{du}{dt} \right)_{\max}} = r U_{н} C^2 \left(\frac{du}{dt} \right)_{\max}, \quad (14)$$

где r - активное сопротивление токопроводящих элементов конденсатора; $I_{мп}$ - амплитуда прямоугольного импульса тока; $t_{и}$ - длительность импульса тока; $U_{н}$ - номинальное напряжение конденсатора; C - номинальная емкость; $\left(\frac{du}{dt} \right)_{\max}$ - наибольшее паспортное значение скорости нарастания напряжения на конденсаторе.

Потери энергии при протекании импульса тока произвольной формы определяются по формуле

$$W_2 = r \int_0^{t_{и}} i^2 dt. \quad (15)$$

Для надежной работы конденсатора должно соблюдаться условие $W_2 \leq W_1$, из которого следует

$$\int_0^{t_{и}} i^2 dt \leq U_{н} C^2 \left(\frac{du}{dt} \right)_{\max}. \quad (16)$$

При форме импульса тока, близкой к синусоидальной, что характерно для конденсаторов ЗУ, выражение (6) после преобразований примет вид

$$I_m \leq 2C \sqrt{\frac{U_{н}}{t_{и}} \left(\frac{du}{dt} \right)_{\max}}, \quad (17)$$

где I_m - амплитуда импульса тока.

Предельно допустимое значение амплитуды импульса тока $I_{мд}$ в соответствии с (17) будет

$$I_{мд} = 2C \sqrt{\frac{U_{н}}{t_{и}} \left(\frac{du}{dt} \right)_{\max}}. \quad (18)$$

Выбор допустимой амплитуды синусоидального напряжения заданной частоты, прикладываемого к конденсатору, и токов конденсатора производится на основе паспортных зависимостей $U_{мд} = \varphi(f)$ на выпускаемую продукцию, указанных разработчиками и предприятиями-изготовителями. Алгоритм определения допустимой амплитуды напряжения конденсаторов по номограммам, предлагаемым предприятиями-изготовителями, представлен на рис. 1.

Применение этих номограмм вызывает неудобства при необходимости построения частотных характеристик конденсаторов в широком диапазоне изменения рабочей частоты и номинальной емкости.

В связи с этим представляется целесообразным получение аналитической зависимости, связывающей допустимую амплитуду напряжения конденсаторов с величиной рабочей частоты и номинальной емкостью, базирующейся на паспортных данных завода-изготовителя.

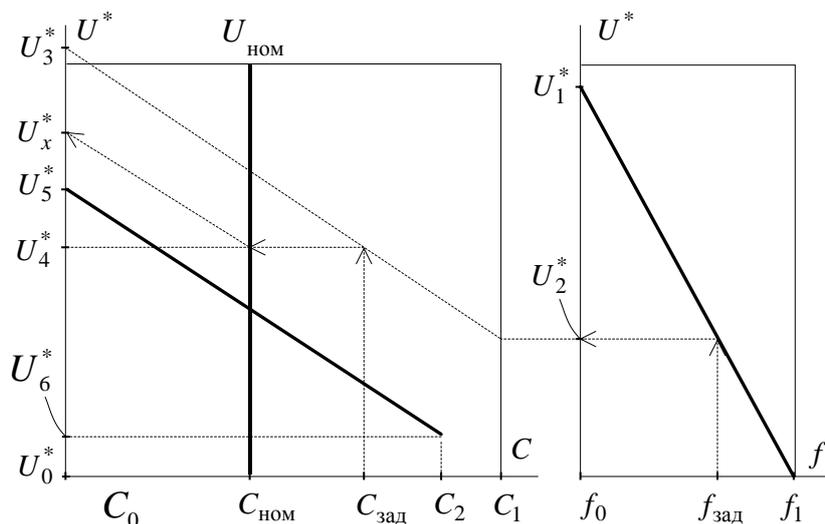


Рис. 1. Номограммы для определения допустимой амплитуды напряжения конденсаторов

Из рис. 1 с учетом логарифмического масштаба диаграмм могут быть получены следующие соотношения:

$$\lg U_2^* = \lg U_1^* - k_1(\lg f_{\text{зад}} - \lg f_0) = \lg U_1^* - k_1 \lg \frac{f_{\text{зад}}}{f_0}, \quad (19)$$

$$\lg U_3^* = \lg U_2^* + k_2(\lg C_1 - \lg C_0) = \lg U_2^* + k_2 \lg \frac{C_1}{C_0}, \quad (20)$$

$$\lg U_4^* = \lg U_3^* - k_2(\lg C_{\text{зад}} - \lg C_0) = \lg U_3^* - k_2 \lg \frac{C_{\text{зад}}}{C_0}, \quad (21)$$

где коэффициенты k_1 и k_2 рассчитываются по формулам:

$$k_1 = \lg \frac{U_1^*}{U_0^*} / \lg \frac{f_1}{f_0}, \quad (22)$$

$$k_2 = \frac{\lg U_5^* - \lg U_6^*}{\lg C_2 - \lg C_0} = \lg \frac{U_5^*}{U_6^*} / \lg \frac{C_2}{C_0}. \quad (23)$$

При определении величины коэффициента k_2 величины U_5^* и C_2 выбираются произвольно. В приведенных выражениях $U_0^*..U_6^*$ - относительные значения напряжений в процентах, определяемые из номограмм, а $f_{\text{зад}}$ - заданное значение рабочей частоты.

Искомое относительное значение допустимой амплитуды напряжения (в процентах) определяется аналогично:

$$\lg U_{\text{мд}}^* = \lg U_4^* + k_2(\lg C_{\text{НОМ}} - \lg C_0) = \lg U_4^* + k_2 \lg \frac{C_{\text{НОМ}}}{C_0}. \quad (24)$$

Подставляя выражения (1...5), (19...23) в (6) и (24), после несложных преобразований, получаем окончательно

$$\lg U_{\text{мд}}^* = \lg U_1^* + \frac{\lg \frac{U_5^*}{U_6^*}}{\lg \frac{C_2}{C_0}} \lg \frac{C_1 C_{\text{НОМ}}}{C_0 C_{\text{зад}}} - \frac{\lg \frac{U_1^*}{U_0^*}}{\lg \frac{f_1}{f_0}} \lg \frac{f_{\text{зад}}}{f_0}. \quad (25)$$

Абсолютное значение допустимой амплитуды напряжения $U_{мд}^*$ рассчитывается по формуле

$$U_{мд} = U_{мд}^* U_{н} = U_{н} \cdot 10^{A-2}, \quad (26)$$

где

$$A = \lg U_{мд}^* = \lg U_1^* + \frac{\lg \frac{U_5^*}{U_6^*}}{\lg \frac{C_2}{C_0}} \lg \frac{C_1 C_{ном}}{C_0 C} - \frac{\lg \frac{U_1^*}{U_0^*}}{\lg \frac{f_1}{f_0}} \lg \frac{f_{зад}}{f_0}; \quad (27)$$

$U_{н}$ - номинальное напряжение конденсатора.

Полученные выражения (26) и (27) позволяют найти частотную зависимость допустимых значений действующего $I_{д}$ и максимального $I_{д}^{max}$ токов конденсатора при $f_{зад} = var$, имеющую вид

$$I_{д} = \sqrt{2\pi} f_{зад} C U_{мд}. \quad (28)$$

Методика выбора конденсаторов ЗУ

Полученные аналитические зависимости, связывающие величину допустимой амплитуды синусоидального напряжения конденсаторов с величиной их емкости и рабочей частоты, позволяют упростить алгоритм выбора конденсаторов и повысить его точность, так как при этом не требуется постоянное обращение к графическому материалу.

В этом случае поиск производится в следующей последовательности.

1. Выбирают предварительно тип конденсатора и его номинальное напряжение $U_{н}$, исходя из рабочей частоты ЗУ и наибольшего размаха несинусоидального напряжения $U_{пн}$, определяемого на основе анализа процессов ЗУ, в соответствии с условием $U_{пн} \leq U_{н}$.

2. По результатам моделирования ЗУ определяют значение $U_{мэ}$, которое принимают за допустимое значение, полагая его равным $U_{мд}$, т.е. $U_{мд} = U_{мэд} = U_{мэ}$.

3. Определяют относительное значение допустимой амплитуды синусоидального напряжения конденсатора $U_{мд}^* = \frac{U_{мд}}{U_{н}}$.

4. Находят расчетную емкость $C_{расч}$, при которой обеспечиваются допустимые потери при заданной частоте f , подставляя полученную величину $U_{мд}^*$ в выражения

$$C_{расч} = C_1 \cdot 10^B, \quad (29)$$

где

$$B = \lg \frac{C_{ном}}{C_0} - \left(\lg U_{мд}^* + \frac{\lg \frac{U_1^*}{U_0^*}}{\lg \frac{f_1}{f_0}} \lg \frac{f}{f_0} - \lg U_1^* \right) \frac{\lg \frac{U_5^*}{U_6^*}}{\lg \frac{C_2}{C_0}}. \quad (30)$$

5. Выбирают ближайшее меньшее из стандартного ряда номиналов значение емкости, соответствующее условию $C \leq C_{расч}$.

6. Находят число N параллельно соединяемых конденсаторов, исходя из требуемых значений емкости дозирующего $C_{д}$ или разделительного $C_{р}$ конденсаторов $N \approx \frac{C_{д(р)}}{C}$, округляя полученное значение до большего целого числа.

7. Находят амплитудное и действующее значение тока единичного конденсатора и сравнивают их с допустимыми значениями синусоидальных величин, определяемых соответственно ранее изложенному:

$$I_{m1} = \frac{I_m}{N} \leq I_{md}, \quad (31)$$

$$I_{\sigma 1} = \frac{I_{\sigma}}{N} \leq I_d^{\max}. \quad (32)$$

8. При нарушении одного из условий (31), (32) задаются увеличенным значением номинального напряжения и повторяют расчет.

Описанная методика дает возможность выбора типов и параметров конденсаторов в установившихся периодических режимах их работы.

В моноимпульсных режимах ЗУ температура нагрева может не достигать допустимых значений, что позволяет увеличить допустимые потери мощности в диэлектрике и токопроводящих элементах в сравнении с установившимся режимом. Однако детальный расчет таких режимов требует знания ряда тепловых параметров конденсаторов, которых, как правило, нет в справочных данных, что обуславливает необходимость проведения объемных теоретических и экспериментальных исследований. В этой ситуации можно применять приведенную методику, учитывая возможное недоиспользование выбранных элементов по нагреву.

Выводы

1. Предложенная методика расчета допустимых режимов конденсаторов ЗУ с применением имитационных моделей, реализованных в среде Matlab Simulink, позволяет обоснованно подходить к выбору конденсаторного оборудования при различных параметрах зарядного цикла в установившемся периодическом режиме его работы.

2. Использование аналитической зависимости, связывающей допустимую амплитуду напряжения конденсаторов с величиной рабочей частоты и номинальной емкостью, полученной на основе паспортных данных, дает возможность достаточно просто рассчитывать характеристики конденсаторов в широком диапазоне изменения рабочей частоты и номинальной емкости.

3. Предложенная методика выбора конденсаторов несложна и может быть применена в расчетах моноимпульсных режимов ЗУ, если допустимо недоиспользование выбираемых элементов по нагреву.

4. Описываемая методика использована в Институте прикладной физики РАН (г. Н.Новгород) при разработке преобразователей мощных ЭФУ различного функционального назначения. В частности, в серии ВВИП для гиротронных комплексов исследовательского и прикладного назначения; ряде ВВИП моноимпульсных твердотельных лазеров петаваттного уровня мощности; ВВИП технологической магнетронной установки для напыления алмазных пленок. Имеющийся значительный опыт эксплуатации этих устройств подтверждает достоверность предлагаемой методики расчета конденсаторов в режимах работы, отличных от паспортных.

5. Методика может быть применена также для выбора конденсаторов других типов преобразовательных устройств с периодическим режимом работы.

Библиографический список

1. **Копелович, Е.А.** Концепция построения высоковольтных источников питания для мощных электрофизических установок // Актуальные проблемы электроэнергетики: труды НГТУ. - Н.Новгород, 2009. Т. 77. С. 32–36.

2. **Кириенко, В.П.** Режимы работы высоковольтных зарядных устройств с дозирующими конденсаторами для электрофизических установок / В.П. Кириенко, Е.А. Копелович // Электричество. 2006. № 5. С. 25–31.
3. **Ермуратский, В.В.** Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях / В.В. Ермуратский, П.В. Ермуратский. – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
4. Высоочастотные полипропиленовые конденсаторы: Каталог ОАО «НИИ «ГИРИКОНД»». – М., 2007.

*Дата поступления
в редакцию 12.03.2010*

V.P. Kirienko, V.V. Vanyaev, E.A. Kopelovich

THE FEATURES OF THE CAPACITORS OPERATION REGIMES IN THE CONVERTERS OF THE ELECTRO PHYSICAL INSTALLATIONS

The features of the capacitors operation regimes in AC/DC are considered. The procedure for the calculation of capacitors allowable operation regimes using converter imitation models and the procedure for capacitors choosing based on the analytical correlation of their parameters derived with the data sheets are proposed.

Key words: capacitor, converter, electrophysical installation, imitation models, procedure for choosing, allowable regimes.