

# Источники питания для зарядки конденсаторов большой ёмкости

Юрий Широков

Источники высокого напряжения постоянного тока крайне востребованы среди производителей рентгеновской медицинской аппаратуры, аппаратуры для неразрушающего контроля металлоконструкций и в сфере безопасности, в радиолокации и в научных исследованиях как составная часть лазерных установок. В данной статье рассказано о модульных источниках TDK-Lambda серии ALE 303, позволяющих конфигурировать системы с требуемыми параметрами, не переплачивая и не экономя на качестве.

### ВСТУПЛЕНИЕ

Источники питания для зарядки конденсаторов серии ALE от компании TDK-Lambda разработаны специально для быстрой и эффективной зарядки конденсаторов в импульсных источниках, предназначенных для питания лазеров и модуляторов.

Приборы ALE функционируют в режиме источников постоянного тока, что делает их как нельзя более подходящими для работы с переменным сопротивлением нагрузки заряжаемого конденсатора. Далее мы выделим преимущества источников питания серии ALE и приведём сведения о некоторых мерах предосторожности, которые полезно знать при зарядке больших накопительных конденсаторов с высокой энергией.

Источники питания для зарядки конденсаторов серии ALE от TDK-Lambda рассчитаны на работу в двух режимах. В своём наиболее распространённом формате они используются в качестве источников для зарядки конденсаторов постоянного тока, которые надёжно заряжают высоковольтные конденсаторы и сети формирования импульсов (Pulse Forming Networks – PFN) в лазерах и модуляторных цепях.

Однако они также могут работать как источники напряжения постоянного тока с непрерывной выходной мощностью для питания ВЧ-генераторов и других непрерывных нагрузок постоянного тока.

### ЗАРЯДКА КОНДЕНСАТОРОВ ОТ ИСТОЧНИКОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Источники питания для зарядки конденсаторов сконструированы и рассчитаны таким образом, что они фактически способны выдавать более чем двукратную среднюю выходную мощность в течение нескольких миллисекунд и при определённых выходных условиях.

Если стандартный источник зарядки конденсатора работает в непрерывном режиме постоянного тока, внутренняя схема обнаружения неисправностей нагрузки отключает его выход примерно через 500 мс, а затем циклически включает и выключает выход с интервалом 500 мс, чтобы предотвратить повреждение источника питания и нагрузки.

Для надёжной работы в непрерывном режиме постоянного тока выходной ток источника зарядки конденсатора ограничивается, так что средняя номинальная мощность блока постоянного тока никогда не может быть превышена.

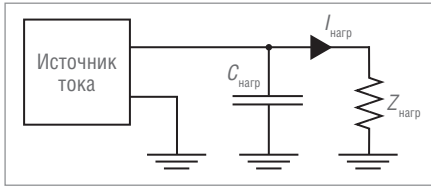
Все источники питания для зарядки конденсаторов серии ALE отрегулированы таким образом на заводе для работы в непрерывном режиме постоянного тока без превышения их средней номинальной мощности. Такой модифицированный источник питания обычно содержит -DC в описании модели, например, 500A-1kV-POS-DC, или 303S-12kV-NEG-DC.

### Ёмкость выходного фильтра источника

Ещё одной особенностью источника питания для зарядки конденсаторов, которую необходимо учитывать при непрерывном постоянном токе, является выходная ёмкость фильтра. В силу характера применения для зарядки конденсаторов источнику питания требуется только очень маленький внутренний фильтрующий конденсатор. Большая ёмкость фильтра в блоке не нужна и может привести к значительным потерям в приложениях с высокой частотой циклов. Низкая выходная ёмкость фильтра, с другой стороны, приводит к плохим характеристикам пульсации во многих непрерывных приложениях постоянного тока, однако пульсацию можно легко улучшить, добавив в цепь нагрузки внешний фильтрующий конденсатор. Выходная пульсация около 1% может быть достигнута добавлением в цепь нагрузки простого и относительно небольшого фильтрующего конденсатора. Если требования к пульсации составляют <math><0,1\%</math> пик–пик, то может потребоваться более сложный выходной LC-фильтр, построенный на основе индуктивностей и ёмкостей, типа т. Благодаря LC-фильтрации последние модели систем ALE имеют показатель пиковой пульсации менее 0,015%.

### ПУЛЬСАЦИИ НАПЯЖЕНИЯ В НАГРУЗКЕ

Ограничение величины пульсации напряжения в нагрузке является ключевым требованием для многих мощных цепей



**Условные обозначения:**  $C_{нагр}$  – ёмкость нагрузки;  $I_{нагр}$  – ток в нагрузке;  $Z_{нагр}$  – сопротивление нагрузки.

**Рис. 1. Простой ёмкостный фильтр**

постоянного тока. Например, пульсация напряжения на некоторых радиочастотных трубках приводит к пульсации выходной частоты, которая может ухудшить параметры системы.

Аппроксимировать пульсацию напряжения относительно просто, если известно несколько параметров схемы. Рассмотрим простой ёмкостный фильтр, схема которого приведена на рис. 1. Хотя точная форма сигнала нагрузки довольно сложна, её можно аппроксимировать сплошной линией, показанной на рис. 2. В этом случае легко определить пульсацию напряжения, рассмотрев скорость разряда конденсатора. Если предположить, что ток зарядки конденсатора неизменен ( $I_{нагр}$ ), то пульсации напряжения можно выразить зависимостью (1):

$$I_{нагр} = \frac{\Delta Q}{T} = C \frac{\Delta V}{T}, \quad (1)$$

где  $I_{нагр}$  – ток нагрузки (А),  $\Delta Q$  – заряд конденсатора (Кл),  $T$  – время (с),  $\Delta V$  – амплитуда пульсаций напряжения (В),  $C$  – ёмкость нагрузки (Ф).

Решение уравнения (1) относительно амплитуды пульсаций напряжения  $\Delta V$  даёт уравнение (2):

$$\Delta V = \frac{I_{нагр} \times T}{C} = \frac{I_{нагр}}{2 \times f \times C}, \quad (2)$$

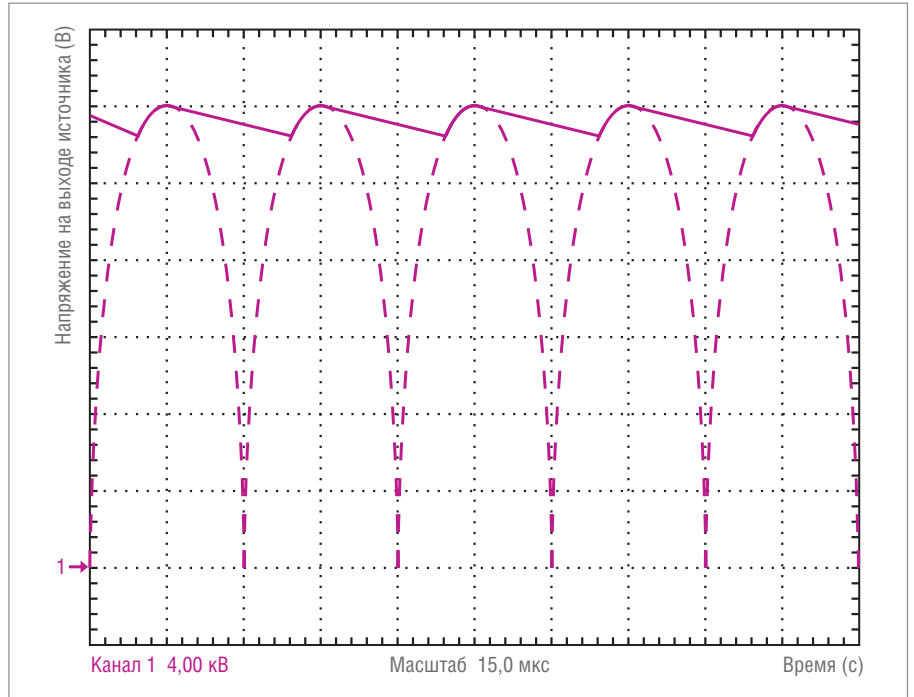
где  $f$  – частота переключения источника тока (Гц).

Уравнение (2) можно переписать относительно  $C$ , что даст необходимую для достижения заданного уровня пульсаций ёмкость фильтрующего конденсатора:

$$C = \frac{I_{нагр}}{2 \times f \times \Delta V}. \quad (3)$$

Поясним это на примерах.

Имеется источник питания модели LC1202-DC мощностью 1 кВт, работающий с нагрузкой 12 А, который должен обеспечить пульсацию от пика до пика 10 В. Какая ёмкость фильтра для этого требуется? (**Примечание.** Частота переключения LC1202-DC составляет примерно 40 кГц.)



**Рис. 2. Форма сигнала в нагрузке**

Применяя формулу (3), получаем:

$$C = \frac{12}{2 \times (40 \times 10^3) \times 10} = 15 \text{ мкФ.}$$

Имеется источник питания 30 кВ модели 303-DC, работающий с нагрузкой 1,5 А и ёмкостью внешнего фильтра 50 нФ. Какова будет амплитуда пульсации напряжения нагрузки? (**Примечание.** Частота переключения 303-DC составляет примерно 30 кГц.)

Применяя формулу (2), получаем:

$$\Delta V = \frac{1,5}{2 \times (30 \times 10^3) \times (50 \times 10^{-9})} = 500 \text{ В.}$$

Как мы убедились, источники питания для зарядки конденсаторов очень хорошо работают в широком спектре применений непрерывного питания постоянным током благодаря простому добавлению внешнего фильтрующего конденсатора для обеспечения приемлемой пульсации. Вот некоторые примеры успешных применений:

- микроволновые трубки:
  - индуктивные выходные трубки (ИОТ),
  - клистронные усилители,
  - магнетроны,
  - гиротроны,
  - трубка бегущей волны (ТВТ);
- рентгеновские трубки;
- питание шин постоянного тока;
  - фильтры-осадители;
  - смещение сетки;
  - питание экранирующего электрода тетродов;
  - генерация плазмы;
  - общие исследования;

- высокоомощные радиочастотные усилители;
- тестирование инверторов;
- радары.

Источники питания ALE для зарядки конденсаторов постоянного тока обеспечивают питание радиолокатора слежения за космическим челноком, ускорителей протонной лучевой терапии, морских радиолокационных систем, прецизионных тепловых приборов и направленного энергетического оружия. Конечный пользователь часто обнаруживает, что высоковольтные продукты серии ALE от TDK-Lambda представляют собой значительно более компактные и дешёвые альтернативы по сравнению с обычными коммутационными и линейными источниками питания постоянного тока.

Номинальные мощности постоянного тока и типовые частоты коммутации для источников постоянного тока ALE приведены в табл. 1. Эти данные могут

**Таблица 1**  
**Параметры источников питания для определения фильтрующих ёмкостей**

Модель	Мощность	Частота переключения
500A	500 Вт	40 кГц
102A	1 000 Вт	40 кГц
152A	1 500 Вт	40 кГц
202A	2 000 Вт	40 кГц
402	4 000 Вт	30 кГц
XR802	6 000 Вт	40 кГц
802	8 000 Вт	30 кГц
LC1202	15 000 Вт	40 кГц
203	30 000 Вт	30 кГц
303	50 000 Вт	30 кГц

быть использованы для определения соответствующих фильтрующих конденсаторов с помощью уравнений (2) и (3).

**Методы защиты от обратного напряжения**

**Простая резистивная защита**

Когда высокое напряжение передаётся по коаксиальному кабелю, например, по кабелю Lambda EMIs ALE HV, он должен быть терминирован сопротивлением, которое равно или больше характеристического импеданса кабеля. Этот резистор ограничивает рассеяние энергии в закороченном кабеле, предохраняя от перегрузки выходные каскады источника. Обратное напряжение может вызвать неустойчивую работу и повредить выходные цепи блока питания. Схема на рис. 3 иллюстрирует типичную нагрузку источника питания при зарядке высоковольтных конденса-

торов. Если в цепи отсутствует последовательное сопротивление  $R_t$ , при замыкании переключателем  $S_1$  выходного кабеля питания (короткое замыкание) энергия  $C_1$  разряжается через  $S_1$ . Импульс, произведённый разрядом, отражается на замкнутом переключателе  $S_1$  и распространяется обратно в выходные каскады блока питания. Добавление к цепи нагрузки  $R_t$  позволяет согласовать выходной импеданс кабеля питания с нагрузкой, и, следовательно, импульс, возникающий при замыкании  $S_1$ , рассеивается в  $R_t$ . Обычно  $R_t$  выбирается с номинальной мощностью 200 Вт и сопротивлением от 50 до 500 Ом. Эти параметры достаточны для удержания напряжения и токов в безопасных пределах во время разряда. Например, номинальная мощность согласующего резистора для источника питания серии 303 при 40 кВ может быть рассчитана следующим образом:  $I_{out} = 1,88$  А,

$R_t = 50$  Ом, тогда средняя мощность  $= (1,88)^2 \times 50 = 176,72$  Вт. Есть и ещё два дополнительных источника тока, которые могут вызвать на несколько порядков большую выделяемую мощность. Первый источник – это распределённая запасённая в выходной ёмкости питающего кабеля  $C_c$  энергия. На рис. 3 видно, что внутренняя ёмкость источника питания  $C_0$  совместно с  $C_c$  разряжается через  $R_t$  и  $R_0$  ( $R_0$  представляет собой выходное сопротивление источника питания, которое обычно составляет несколько Ом или меньше) каждый раз, когда  $S_1$  замыкается. Типичное значение для  $C_0$  составляет 200 пФ и зависит от длины выходного кабеля приблизительно в пропорции 30 пФ/фут. Для стандартного 10-футового (~ 3 метра) кабеля эта ёмкость может составлять 300 пФ.

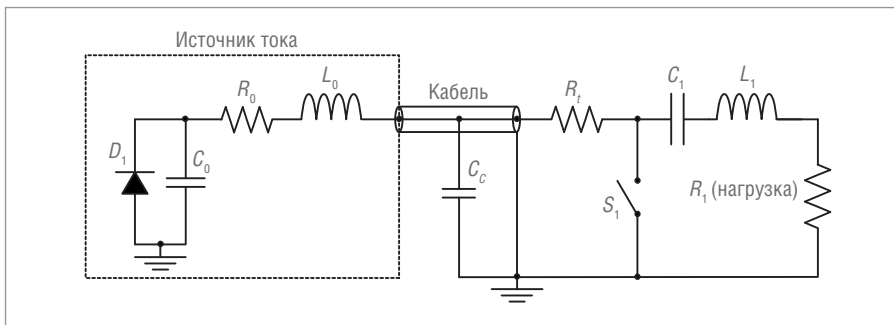
Если предположить, что напряжение заряда цепи составляет 40 кВ, запасённая в  $C_0$  и  $C_c$  энергия составит:

$$E = \frac{CV^2}{2} = \frac{500 \text{ пФ} \times (40 \text{ кВ})^2}{2} = 0,4 \text{ Дж}.$$

Если циклы разряда повторяются с частотой 1 кГц, тогда средняя мощность, рассеиваемая в  $R_t$  и  $R_0$ , составляет  $0,4 \text{ Дж} \times 1000$ , или 400 Вт. Дополнительная рассеиваемая мощность в  $R_t$  вызвана обратным напряжением через  $S_1$ . Например, при положительной выходной мощности питания, если разрядная цепь недостаточно демпфирована, при переключении  $S_1$  замыкает высоковольтный кабель, и переходное отрицательное напряжение подаётся на выход источника питания. Когда это произойдёт, ток потечёт через источник питания, выходные выпрямительные диоды и  $R_t$  на землю, как это показано на рис. 4. Если пиковый ток, связанный с изменением напряжения нагрузки, будет достаточно большой, это может вызвать повреждение выходных выпрямителей. Порог этого повреждения при реверсе напряжения трудно определить количественно, но если изменение направления напряжения может приводить к тому, что выходной ток будет больше номинального выходного тока источника питания, тогда в цепь нагрузки следует добавить защитный диод. Следующая формула может использоваться в качестве руководства при выборе диода защиты от обратного напряжения.

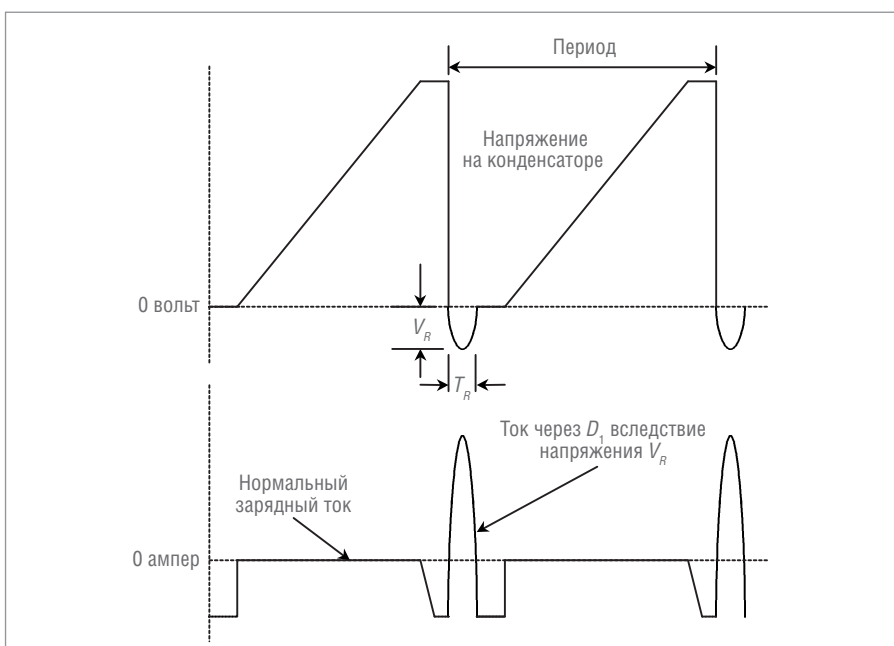
$$\text{Если } \frac{V_R}{R_t} > I_{ном},$$

где  $V_R$  – реверсивное напряжение (В),



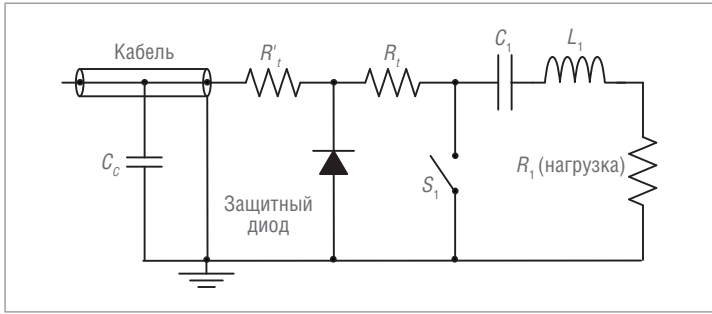
Условные обозначения:  $C_t, L_t, R_t$  – эквивалентная схема нагрузки блока питания;  $S_1$  – переключатель, закорачивающий выход источника питания;  $C_0, L_0, R_0$  – эквивалентная схема блока питания;  $D_1$  – предохранительный диод;  $C_c$  – выходная ёмкость кабеля;  $R_t$  – последовательное сопротивление.

Рис. 3. Эквивалент нагрузки, подключённой к высоковольтному блоку питания



Условные обозначения:  $V_R$  – реверсивное напряжение;  $T_R$  – длительность импульса;  $D_1$  – предохранительный диод.

Рис. 4. Выходной ток выпрямителя источника питания в условиях реверса напряжения



**Условные обозначения:**  $R'_t$  – гасящий резистор;  $R_t$  – резистор;  $C_c$  – эквивалентная ёмкость кабеля;  $C_1, L_1, R_1$  – эквивалентная схема нагрузки блока питания;  $S_1$  – переключатель, закорачивающий выход источника питания.

**Рис. 5. Схема защиты от реверсивного импульса**

$I_{ном}$  – номинальный выходной ток источника питания высокого напряжения,  $R_t$  – последовательное сопротивление, показанное на рис. 3, то требуется установка защитного диода.

**Диодно-резистивная защита**

Типовая схема нагрузки с дополнительным защитным диодом приведена на рис. 5.

Правильный выбор байпасного диода очень важен для обеспечения надёжности и эффективной защиты от обратного тока. Пользователь должен убедиться, что выбранный диод удовлетворяет следующим трём условиям:

- номинальное обратное напряжение диода должно быть больше, чем рабочее напряжение цепи нагрузки и рабочее напряжение источника питания;
- среднеквадратичное значение тока, протекающего через диод, меньше, чем номинальная цифра, заявленная производителем;
- прямое падение напряжения на диоде в проводящем состоянии должно быть меньше падения напряжения на диодах блока питания (если  $R_t$  не используется).

В целях безопасности пользователь должен принять коэффициент номинального напряжения равным 1,5 для обеспечения запаса на случай перенапряжения вследствие переходных процессов в цепи нагрузки. То есть в случае номинала питания 20 кВ диод обратной защиты должен быть рассчитан примерно на 30 кВ.

Средний допустимый ток через защитный диод ( $I_{RMS}$ ) должен быть выше тока из-за реверсирования напряжения нагрузки. Значение  $I_{RMS}$  можно определить, выполнив следующие действия.

Пиковый ток  $I_{PK}$  при реверсировании напряжения определяется:

$$I_{PK} = \frac{V_R}{R_t}$$

где  $R_t$  – резистор, показанный на рис. 5. Импульсный обратный ток одного цикла составляет:

$$I_{RMS} \text{ (одного импульса)} = \frac{I_{PK}}{\sqrt{2}}$$

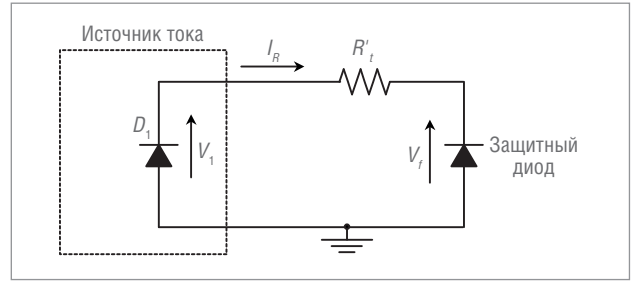
Для периодических импульсов в нагрузке общее среднеквадратичное значение тока через защитный диод можно определить по формуле:

$$I_{RMS} = I_{RMS} \text{ (одного импульса)} \times \sqrt{\text{время рабочего цикла}}$$

VR можно измерить осциллографом с помощью высоковольтного зонда. Начинать измерение надо с источником питания, настроенным на низкое выходное напряжение, без байпасного диода. Для этих условий требуется определить величину обратного импульса. Затем использовать полученные значения как руководство, чтобы понять, чего ожидать от полного рабочего напряжения, что позволит избежать аварийной ситуации. Прямое падение напряжения на защитном диоде критически важно для достижения эффективной защиты. Схема на рис. 6 иллюстрирует эквивалентную выходную цепь источника питания с реверсом напряжения. Обратный ток  $I_R$  определяется по формуле:

$$I_R = \frac{V_f - V_1}{R'_t}$$

Сопротивление  $R'_t$  должно быть выбрано таким, чтобы поддерживать  $I_R$  на уровне, меньшем или равном номинальному выходному току источника питания. Ключевым моментом при вы-



**Условные обозначения:**  $V_f$  – реверсивное напряжение;  $V_1$  – напряжение источника питания;  $I_R$  – ток в нагрузке;  $R'_t$  – гасящий резистор;  $D_1$  – предохранительный диод.

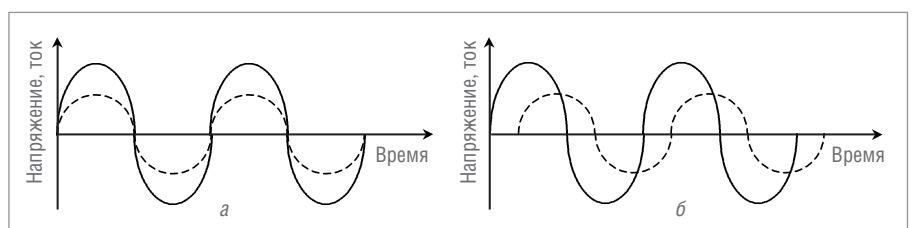
**Рис. 6. Эквивалентная схема выхода источника питания с реверсом через защитный диод**

боре защитного диода является обеспечение значения реверсивного напряжения  $V_f$  настолько низким, насколько это возможно ( $V_1$  – напряжение источника питания).

**Что такое коррекция коэффициента мощности**

Импульсный источник питания может потреблять примерно 950 Вт при стандартном напряжении питания 110 В переменного тока и установленном автомате защиты номиналом 15 А. Простой тостер при этих же условиях может выдавать мощность почти 1400 Вт. Эта разница связана с низким коэффициентом мощности импульсного источника питания. Если скорректировать коэффициент мощности источника питания, то он сможет потреблять большую мощность, что позволяет ему питать большую нагрузку от той же сети.

Технически коэффициент мощности (Power Factor, PF) – это отношение потребляемой электроприёмником активной мощности к полной потребляемой мощности, он выражается десятичным значением в пределах от 0 до 1. Коэффициент мощности можно интерпретировать как разность фаз между синусоидальными значениями сигналов напряжения и тока в нагрузке. Когда в нагрузке переменного тока присутствует ёмкостная или индуктивная составляющая, между током и напряжением в нагрузке образуется сдвиг фаз, как показано на рис. 7. Это вызывает протекание



**Рис. 7. Сдвиг фаз между током и напряжением в питающей сети: а – напряжение и ток совпадают по фазе (PF = 1); б – напряжение и ток не совпадают по фазе (PF < 1)**



в цепи нагрузки паразитного тока, не потребляемого нагрузкой, но создающего потери в силовых кабелях, равные  $I^2R$ . Простой резистор имеет наивысший коэффициент мощности, равный 1, так как ток, протекающий через него, абсолютно совпадает по фазе с напряжением. Электродвигатель является индуктивной нагрузкой, что особенно ярко выражается при его запуске. Фаза волны тока через него отстаёт от фазы волны напряжения, снижая коэффициент мощности. Вот почему на многих двигателях переменного тока устанавливают пусковые конденсаторы, корректирующие коэффициент мощности во время запуска двигателя.

Импульсный источник питания, если рассматривать его как устройство переменного тока, не является ни ёмкостной, ни индуктивной нагрузкой – он нелинеен. Дискретный режим переключения источника питания вызывает короткие импульсы тока в питающей сети, которые находятся в фазе с линейным напряжением. Среднеквадратичное значение мощности такого источника ( $U_{RMS} \times I_{RMS}$ ) значительно превышает реально потребляемую им мощность, что определяет PF импульсного источника в пределах 0,65.

### Корректор коэффициента мощности

Неединичный коэффициент мощности можно улучшить с помощью корректоров коэффициента мощности (ККМ, или Power Factor Corrector, PFC). В случае импульсных источников питания они позволяют сгладить пульсирующий переменный ток, снизив его среднеквадратичное значение и улучшив таким образом PF. Существует два основных типа ККМ: активный и пассивный.

Активный ККМ более эффективен, но и более дорог. Он, как правило, интегрируется в схему импульсного источника питания и может обеспечивать PF до 0,98.

Пассивный ККМ более надёжный, простой и недорогой. Он обычно даёт PF до 0,90.

### Получение дополнительной выходной мощности

Чтобы определить, насколько большая мощность станет доступна при применении ККМ, пользователь должен знать следующее уравнение, определяющее количество энергии, доступной от источника питания:

$P_{out} = V_{L\ RMS} \times I_{L\ RMS} \times PF \times Eff$ ,  
где  $P_{out}$  – выходная мощность,  $V_{L\ RMS}$  – среднеквадратичное напряжение на нагрузке,  $I_{L\ RMS}$  – среднеквадратичный ток в нагрузке,  $Eff$  – КПД нагрузки.

Например, напряжение питания источника ограничивает линейный ток системы до 80% от номинала автоматического выключателя. Для обычного выключателя с уставкой 15 А максимально допустимая величина постоянно протекающего тока – 12 А, а доступная мощность в лучшем случае будет равна 120 В переменного тока  $\times$  12 А = 1440 Вт. Импульсный источник питания с КПД 85% и PF = 0,65 может обеспечить только  $(120 \times 12 \times 0,65 \times 0,85) = 796$  Вт. Однако если повысить коэффициент мощности до 0,98, тот же источник питания теперь сможет обеспечивать  $(120 \times 12 \times 0,98 \times 0,85) = 1200$  Вт, что означает увеличение на 51%.

Источники серии ALE могут комплектоваться как активными, так и пассивными ККМ, в зависимости от их уровня мощности. Источники питания высокой мощности с 3-фазными входами используют пассивный ККМ, что позволяет получить типичное значение коэффициента мощности от 0,8 до 0,9. Пассивный ККМ много проще в реализации, чем активный, особенно если речь идёт о высоких мощностях и трёхфазном питании.

Есть и ещё один фактор, с которым помогают бороться блоки ККМ, – гармоника. Они возникают, когда питающий ток не имеет форму чистой синусоиды, как в случае с импульсной нагрузкой, которую представляют собой высоковольтные источники питания. Гармонические токи не влияют на мощность нагрузки, но вызывают нежелательные потери в питающей линии и снижают КПД силового трансформатора. ККМ в таких случаях позволяет подавлять гармоники, оставляя чистую «фундаментальную» частоту.

### Параллельные системы высокой мощности

Для применений, требующих средней мощности свыше 50 кВт, можно использовать несколько источников питания в параллельной системе постоянного тока. Необходимо позаботиться о том, чтобы обеспечить эффективное распределение нагрузки между блоками, и лучший способ добиться этого – использовать системный контроллер. Команда TDK-Lambda имеет большой опыт работы с чрезвычайно мощными

системами постоянного тока, построенными в основном на источниках питания серии 303 с использованием центрального системного контроллера. Эти системы используют сложные топологии управления, которые обеспечивают превосходные уровни пульсации, хорошее регулирование, высокую стабильность в сочетании с низким уровнем запасаемой энергии.

Далее приведены некоторые примеры системных параметров:

- средняя мощность до 1 МВт;
- пульсации лучше, чем 0,015% (пик–пик);
- выходная накопленная энергия менее 10 Дж;
- стабильность лучше, чем 10 ppm/°C ( $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ );
- регулирование лучше 0,0001%;
- КПД 90%;
- отклик на появление дуги – быстрее 50 мкс.

### Зарядка в режиме неисправности нагрузки

Источники питания ALE рассчитаны на работу в условиях циклических процессов, которые часто выражаются в десятках или сотнях циклов заряда/разряда в секунду. В этом случае время зарядки конденсатора короткое, и источник питания достигает запрограммированного выходного напряжения обычно в течение нескольких единиц либо десятков миллисекунд.

Когда источники питания используются в режиме зарядки большими токами в течение нескольких секунд или дольше, источник будет сигнализировать о неисправности нагрузки или о состоянии перегрузки. Система отслеживания неисправности нагрузки – это простая схема на основе таймера внутри источника питания, предназначенная для защиты его самого и подключённой нагрузки в случае внешнего короткого замыкания или проблем с нагрузкой. Если выходное напряжение не достигает запрограммированного значения после зарядки в течение 500 мс, выход питания выключается (переход в состояние «выкл.») и источник указывает на неисправность нагрузки. По истечении 500 мс в состоянии «выкл.» индикация неисправности нагрузки исчезает и источник питания автоматически снова начинает перезаряжать нагрузку. Эти циклы (500 мс вкл. / 500 мс выкл.) продолжаются до тех пор, пока не будет достигнуто запрограммированное выходное напряжение, что приводит к

ступенчатой форме сигнала зарядного напряжения.

Работа источника питания в этом режиме не приведёт к каким-либо повреждениям устройства, но это не самый быстрый способ зарядки нагрузки, так как источник питания эффективно функционирует только 50% времени рабочего цикла.

### АДАПТЕР БЫСТРОЙ ЗАРЯДКИ

Чтобы реализовать самое быстрое время зарядки от любого источника питания ALE, заряжающего большие высокоэнергетические накопительные конденсаторы, имеется специальный дополнительный модуль, оптимизирующий профиль выходного тока источника питания. Использование этого модуля приводит к значительному увеличению относительного времени зарядки по сравнению с обычными высоковольтными источниками питания постоянного тока (HVDC) с идентичными номинальными мощностями или источниками зарядки конденсаторов, работающими в описанном режиме неисправности нагрузки.

Адаптер ALE Long Charge Adapter (или LCA) – это простой модуль, который подключается к интерфейсу дистанционного управления источником питания и изменяет его выходной ток так, чтобы автоматически минимизировать время зарядки при больших нагрузках (рис. 8). С установленным LCA система отслеживания неисправности нагрузки модифицируется, позволяя источнику питания непрерывно подавать свой полный номинальный зарядный ток на протяжении времени, когда выходное напряжение на нагрузке составляет менее 50% от номинального, и линейно снижать выходной ток до половины своего номинального значения

по мере приближения к 100% номинального напряжения. Модуль LCA не требует модификации обычных цепей управления и работает как в удалённом, так и в локальном режиме.

Расчёт времени зарядки нагрузки с помощью источника питания, оснащённого LCA, производится по электронной таблице моделирования заряда, которую можно получить на веб-сайте компании или связавшись с заводом-изготовителем. Моделирование требует определения параметров цепи

нагрузки (заряжаемая ёмкость, напряжение заряда, номинальное напряжение питания) и позволяет пользователю определить различные комбинации источников питания для оптимальной работы схемы.

### ПРИМЕРЫ РАСЧЁТОВ

#### Обычный источник питания HVDC

Обычный источник питания HVDC мощностью 30 кВт, 26 кВ имеет номинальный выходной ток 1,15 А



Рис. 8. Блок питания с установленным LCA-модулем

**НАДЁЖНОСТЬ  
БЕЗОПАСНОСТЬ  
РЕАЛЬНОЕ ВРЕМЯ**

**Программно-аппаратные комплексы  
с операционной системой  
реального времени**

**QNX PROSOFT® ADVANTIX**

**PROSOFT®** | ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР  
(495) 234-0636 • INFO@PROSOFT.RU • WWW.PROSOFT.RU

(30 кВт/26 кВ). Время зарядки нагрузочного конденсатора ёмкостью 7000 мкФ до напряжения 24 кВ вычисляется:  
 $T_c = C \times V / I = 7000 \times 10^{-6} \times 24 \times 10^3 / 1,15 = 146$  с.

### Источник питания для зарядки конденсаторов без LCA

Модель 303 ALE представляет собой источник зарядки конденсатора мощностью 30 кВт с пиковым выходным током 2,88 А при 26 кВ. Средний зарядный ток составляет половину этого значения (1,44 А), когда источник питания работает в режиме неисправности нагрузки. Время зарядки вычисляется:  
 $T_c = C \times V / I = 7000 \times 10^{-6} \times 24 \times 10^3 / 1,44 = 117$  с.

### Источник питания для зарядки конденсаторов с LCA

При использовании той же модели источника питания ALE 303 и адаптера длительного заряда время зарядки нагрузки до 24 кВ составляет  $T_c = 66$  с (расчёт произведён с использованием электронной таблицы моделирования).

На рис. 9 приведены кривые зарядки конденсатора для всех перечисленных случаев. Эта диаграмма и данные на ней ясно показывают, что источник питания ALE 303, оснащённый LCA и имеющий ту же номинальную мощ-

ность, что и обычный источник постоянного тока (30 кВт), заряжает нагрузку 7000 мкФ до 24 кВ более чем в два раза быстрее.

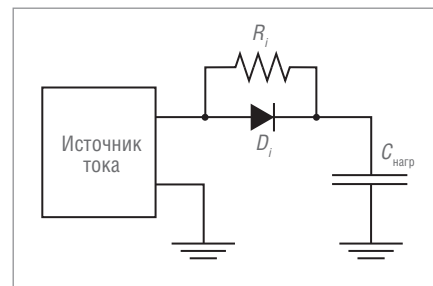
Более короткое время зарядки значительно снижает стресс нагрузочного конденсатора, что приводит к увеличению срока его службы. Существует три различных LCA, каждый из которых предназначен для использования с одним из трёх семейств продуктов. Все LCA функционируют идентично, но имеют различное расположение выводов разъёма в зависимости от интерфейса управления семейства блоков питания:

- номер 26922100 для моделей 500A, 102A, 152A и 202A;
- номер 26922200 для моделей 402, 802, XR802 и LC1202;
- номер 26922300 для моделей 203 и 303.

LCA можно приобрести вместе с источником во время заказа или в качестве запасной части через ремонтный склад.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ

Когда источник питания для зарядки конденсатора используется для зарядки цепи нагрузки, накапливающей более 1 кДж энергии, между источником питания и нагрузкой целесообразно доба-



Условные обозначения:  $R_i$  – гасящий резистор;  $D_i$  – предохранительный диод;  $C_{нагр}$  – ёмкость нагрузки.

Рис. 10. Рекомендуемая изолирующая сеть для подключения нагрузок высокой ёмкости

вить внешнюю изолирующую цепь. Она предотвратит разрядку нагрузочного конденсатора в источник питания в случае неисправности в выходной секции источника питания. Если изолирующая цепь не была установлена, гарантия на источник питания может быть аннулирована. Рекомендуемая изолирующая цепь показана на рис. 10. Диод  $D_i$  изолирует источник питания от нагрузки и в случае катастрофического сбоя в выходной секции источника питания предотвратит быстрый разряд энергии, накопленной в  $C_{нагр}$ , через источник питания, что может представлять угрозу безопасности.  $D_i$  должен иметь номинальное обратное напряжение, по крайней мере в 1,5 раза превышающее номинальное напряжение источника питания, и номинальный прямой ток, по крайней мере в 2 раза превышающий номинальный ток источника питания. Резистор  $R_i$  предназначен для рассеивания энергии, накопленной в  $C_{нагр}$ , в случае выхода источника питания из строя. Значение сопротивления  $R_i$  должно быть приблизительно в пределах 100 Ом с возможностью рассеяния всей накопленной в  $C_{нагр}$  энергии. Для обеспечения дополнительной изоляции рекомендуется перед разрядкой нагрузки отключить источник питания от цепи нагрузки с помощью высоковольтного реле или расцепителя.

### ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ СИЛОВЫЕ РЕШЕНИЯ ПОД КЛЮЧ

Компактные высоковольтные энергосистемы под ключ ALE (рис. 11) основаны на более чем 20-летнем успешном опыте проектирования и поставки решений для электропитания постоянным током мощностью несколько кВт. Они удовлетворяют требованиям самых сложных приложений. Широкое использование стандартных функцио-

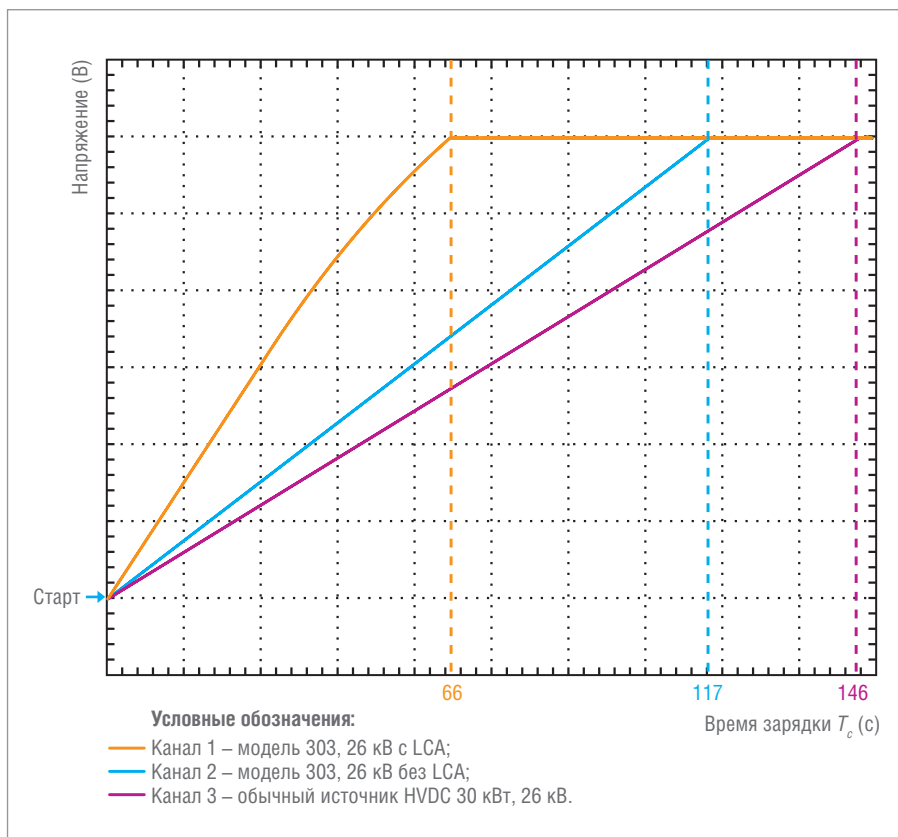


Рис. 9. Изменение напряжения на нагрузке при различных вариантах зарядки





Рис. 11. Система на основе стандартных модулей серии ALE от TDK-Lambda

нальных блоков обеспечивает максимальную гибкость проектирования и производительность систем, сводя к минимуму их стоимость и время ожидания готовности. В модульном и масштабируемом подходе TDK-Lambda к проектированию для подачи первичного высокого напряжения постоянного тока в систему используется объединение нескольких стандартных силовых модулей серии ALE 303 мощностью 50 кВт. Выходы силовых модулей этой серии объединяются при помощи простой распределительной коробки, которая также может содержать выходной фильтр и обеспечивать обратную связь по напряжению/току. Выходы всей системы и отдельных силовых модулей централизованно контролируются главным контроллером, обеспечивающим как локальный, так и удалённый пользовательский интерфейс. Главный контроллер генерирует все управляющие сигналы, необходимые для каждого из силовых модулей 303S. Использование технологии управления частотой многофазной сети переменного тока приводит к низким пульсациям выходного напряжения без необходимости в большом накоплении выходной энергии конденсаторами фильтра. Контроллер взаимодействует с каждым силовым модулем серии 303 (или с их блоком) и с распределительной коробкой, что обеспечивает стабильное выходное напряжение системы и обратную связь по току, а также контроль рабочего состояния системы.

Каждый силовой модуль состоит из одного блока питания модели 303S с во-

дьяным охлаждением. 303S – проверенный временем блок питания мощностью 50 кВт. Его номинальное напряжение может регулироваться в пределах 5...50 кВ. Общее количество модулей 303S, необходимых в системе, определяется требованиями к питанию из расчёта одного модуля на каждые 50 кВт мощности (один на 40 кВт при входном напряжении 400 В переменного тока).

Поскольку система на 100% масштабируема, теоретически ограничений на

количество источников питания серии ALE 303, которые могут быть подключены параллельно, нет. Следовательно, с использованием стандартных модулей могут быть построены ультракомпактные системы очень высокой мощности.

Если сверхнизкое накопление энергии и малые пульсации являются обязательными условиями, распределительная коробка может комплектоваться сложным многоступенчатым LC-фильтром.

**YASKAWA**

VIPA MICRO PLC



VIPA CONTROLS



- Сверхкомпактный ПЛК
- Высокая плотность каналов ввода/вывода
- В 2 раза меньше аналогов
- В 20 раз быстрее аналогов
- Индикатор состояния каждого канала



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636 • INFO@PROSOFT.RU • WWW.PROSOFT.RU

Реклама



Спецификация высоковольтных источников питания TDK-Lambda серии ALE

Средняя продолжительная мощность по постоянному току	Имеются модели от 60 кВт до 1 МВт и более
Диапазон выходных напряжений	Имеются модели от 5 до 50 кВ с регулировкой выхода в пределах 10...100% номинального напряжения
Ток нагрузки	Регулируемый в пределах 10...100% от допустимого
Напряжение питания переменного тока	480 В (3-фазное), 400 В (3 фазы + опциональная нейтраль)
Полярность	Доступны модели с положительной и отрицательной полярностью. Опционально – переключаемые
Коэффициент мощности	С пассивным ККМ – лучше 0,92 при полной нагрузке и номинальных параметрах питающей линии
КПД	Лучше 85% при полной нагрузке и номинальных параметрах питающей линии
Точность	Стандартно – 1%, опционально – 0,1%
Стабильность	Стандартно – 100 ppm/°C, опционально – 10 ppm/°C
Запасаемая энергия	Стандартно – менее 50 Дж, опционально – 10 Дж
Пульсации	Стандартно – 1% от выходного напряжения (пик-пик), опционально – 0,01%
Нестабильность по нагрузке	Стандартно – менее 0,1%, опционально – 0,01%
Охлаждение	Водяное, около 9 литров в минуту на модуль 50 кВт, минимальная температура +15°C, максимальная температура +35°C
Допустимые диапазоны температур	Диапазон температур хранения –40...+85°C; диапазон рабочих температур +5...+45°C
Допустимая влажность	10...90% без конденсации влаги
Защита	Разрыв цепи/короткое замыкание, перегрузка, дуга, перенапряжение, превышение тока
Защита от дуги в нагрузке	Отключение выхода менее чем за 50 мкс
Индикация режимов работы	Переключатель питания вкл./выкл.
	Кнопка включения/выключения высокого напряжения
	Переключатель локального/дистанционного управления
	Кнопка просмотра текущих настроек
	10-оборотный потенциометр выходного напряжения
	10-оборотный потенциометр выходного тока
	Регулировка уставки срабатывания по перенапряжению
	Регулировка уставки срабатывания при перегрузке по току
	Цифровые индикаторы напряжения и тока
Удалённое управление	Светодиодные индикаторы состояния
	Полностью изолированное удалённое аналоговое программирование и считывание напряжения и тока
	Изолированные цифровые входы включения/выключения и запрета подачи высокого напряжения
Опции	Изолированное цифровое считывание/мониторинг состояния
	Полностью интегрированная система под ключ, монтируемая в стойку, со всеми охлаждающими и контрольными кабелями в комплекте
	Выход с повышенной стабильностью (10 ppm/°C), высокая точность (до 0,01%)
	Низкая выходная накопленная энергия (10 Дж или меньше), низкие пульсации (0,01% или лучше)
	Пользовательский выходной фильтр LC
	Нестабильность по нагрузке/линии лучше, чем 0,001%
	Нестандартные высоковольтные разъёмы
«Плавающий» высоковольтный выход	

Описанный модульный и масштабируемый подход к проектированию позволяет TDK-Lambda предлагать компактные и мощные источники со средней выходной мощностью от 60 кВт до более 1 МВт под ключ с использованием типовых проверенных базовых блоков.

В табл. 2 приведены некоторые параметры источников TDK-Lambda серии ALE.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изделия TDK-Lambda серии ALE представляют собой не просто источники ки высокого напряжения.

Использование данных источников питания для зарядки конденсаторов даёт в руки пользователям готовые проверенные временем решения, которые избавят от множества проблем и позволят существенно сэкономить на

оборудовании. Ознакомиться более детально с характеристиками изделий, получить техническую консультацию по их применению и приобрести источники питания можно в компании ПРОСОФТ, которая является официальным представителем TDK-Lambda в России. ●

E-mail: [textoed@gmail.com](mailto:textoed@gmail.com)

**CyberPower**<sup>®</sup>  
Reliability. Quality. Value.

# Больше мощности на меньшей площади 6000 Вт в 2U



- Технология двойного преобразования (online)
- Коэффициент мощности = 1
- Встроенные аккумуляторные батареи
- Подключение до 10 внешних батарейных блоков
- Технология выравнивания заряда
- «Горячая» замена батарей через фронтальную панель
- Карта сетевого управления в комплекте

## ИБП CyberPower OL5KERTHD / OL6KERTHD

5000 Вт / 6000 Вт



**PROSOFT**<sup>®</sup>  
WWW.PROSOFT.RU

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

МОСКВА  
(495) 234-0636  
info@prosoft.ru

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
(812) 448-0444  
info@spb.prosoft.ru

ЕКАТЕРИНБУРГ  
(343) 356-5111  
info@prosoftsystems.ru  
(912) 620-8050  
ekaterinburg@regionprof.ru

