



# АСИНХРОННЫЕ ВОЗБУДИТЕЛИ И СТАБИЛИЗАТОРЫ ДУГИ. АНАЛИЗ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА. Ч. 1

Н.М. МАХЛИН<sup>1</sup>, А.Е. КОРОТЫНСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины». 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

<sup>2</sup> ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены вопросы схемотехники и анализа процессов в электронных вольтодобавочных устройствах асинхронного типа с последовательным включением в цепь основной или вспомогательной («дежурной») дуги, имеющих конфигурацию формирующего контура, в котором емкостной накопитель и индуктивность первичной обмотки импульсного повышающего трансформатора соединены последовательно, а коммутирующий ключ контура подключен параллельно этому соединению. В первой части работы описаны схемотехнические решения входящих в состав асинхронных возбудителей и стабилизаторов процесса горения дуги зарядных устройств на основе ключевой схемы с дозирующим реактором и диодно-конденсаторного умножителя напряжения. Анализ процесса горения дуги в цепях этих функциональных узлов асинхронных возбудителей и стабилизаторов выполнен с использованием решений известных в теоретической электротехнике уравнений. Предложены базирующаяся на этих решениях инженерная методика расчета основных компонентов зарядных устройств асинхронных возбудителей и стабилизаторов процесса горения дуги, а также рекомендации по выбору их элементной базы. Библиогр. 29, табл. 3, рис. 9.

*Ключевые слова:* дуговая и плазменная сварка, первоначальное возбуждение дуги, повторные зажигания дуги, электронные возбудители дуги, искровой разряд, последовательное включение, методика расчета, рекомендации

В последние десятилетия среди электронных вольтодобавочных устройств, получивших название возбудителей и стабилизаторов дуги и предназначенных для инициирования стационарного дугового разряда путем ионизации межэлектродного промежутка за счет инъекции в него импульсов высокого напряжения, все большее распространение находят устройства асинхронного типа с последовательным включением в цепь основной или вспомогательной («дежурной») дуги. Отличительными особенностями таких устройств являются:

- постоянство энергии и амплитуды выходных высоковольтных импульсов независимо от моментов периодических включений коммутирующего ключа генераторной части устройств;

- конфигурация формирующего контура, согласной которой коммутирующий полупроводниковый ключ подключен параллельно последовательному соединению индуктивности  $L$  и емкости  $C$  контура;

- во многих случаях отдельные цепи импульсного аperiodического заряда емкости  $C$  с использованием повышенного (по отношению к напряжению питания устройства) напряжения постоянного тока и разряда (перезаряда) этой емкости, сопровождаемого переходным затухающим процессом при каждом включении коммутирующего ключа формирующего контура;

- заметно более высокий КПД, чем у возбудителей и стабилизаторов дуги, у которых формирующий контур представляет собой последо-

вательное соединение коммутирующего ключа и реактивных элементов ( $L$  и  $C$ );

- возможность в ряде случаев обеспечения универсальности по роду напряжения питания (входного напряжения).

Существует значительное количество работ, посвященных импульсным устройствам, принцип действия которых базируется на зарядно-разрядных циклах емкостных накопителей электрической энергии. Теоретические основы зарядных цепей таких накопителей энергии наиболее полно и подробно рассмотрены в фундаментальной работе [1]. Вместе с тем в немногих работах, например [2–4], посвященных асинхронным возбудителям и стабилизаторам дуги (АВСД), вопросы анализа электромагнитных процессов в устройствах этой группы, их схемотехники и расчета рассмотрены фрагментарно и в недостаточном для практического использования объеме, что вызывает определенные затруднения при разработке и проектировании АВСД.

Цель настоящей работы — рассмотрение и анализ процессов в АВСД с использованием известных в теоретической электротехнике методов исследования линейных цепей и выработка рекомендаций по расчету и выбору компонентов устройств этой группы, вытекающих из результатов их анализа и опыта разработки, изготовления и практического применения.

**Особенности схемотехники, анализа и расчета функциональных узлов АВСД.** АВСД от-



носятся к импульсным устройствам, обеспечивающим в периодическом режиме накопление электрической энергии и ее последующий расход путем электрического разряда для создания или удержания плазмы.

Как и в большинстве устройств с импульсным расходом энергии, в АВСД для аккумуляции электрической энергии применяют ее емкостные накопители, преимуществами которых являются простота осуществления коммутаций при их заряде и разряде, а также возможность контролируемого дозирования накопленной энергии путем стабилизации уровня напряжения заряда [1].

Использование емкостных накопителей обуславливает обязательное наличие в структуре АВСД зарядного устройства (ЗУ). Помимо ЗУ, в базовую структуру АВСД входят генератор импульсов повышенного напряжения (ГИН) со схемой управления и устройство ввода высоковольтных импульсов (УВВИ) в цепь основной или вспомогательной дуги (рис. 1).

Существующее в настоящее время многообразие схемных решений ЗУ и протекающих в них процессов дает основания считать, что для построения ЗУ в АВСД возможно использование:

- импульсного преобразования напряжения постоянного тока с помощью полупроводниковых инверторов, конверторов DC-DC повышающего типа, преобразователей на базе схемы Поликарпова (часто именуемой схемой Кука), Люо-преобразователей, ключевых схем с дозирующими реакторами;

- выпрямления и повышения (умножения) входного напряжения однофазного переменного тока до требуемого уровня напряжения заряда емкостного накопителя ГИН с помощью устройств, выполненных по схеме диодно-емкостных ум-

ножителей напряжения, например, по схеме Кокрофта–Уолтона;

- метода резонансной накачки.

Процессы в ЗУ с инверторами рассмотрены в работах [1, 5, 6 и др.], анализ и основы расчета полупроводниковых конверторов DC-DC и преобразователей на базе схемы Поликарпова (Кука) приведены в работах [5–8], Люо-преобразователей — в работе [9]. Наиболее существенным и общим топологическим признаком всех без исключения импульсных преобразователей постоянного тока является обязательное наличие в их составе одного или нескольких индуктивных накопителей, а также управляемых полупроводниковых ключей и их контроллеров, обеспечивающих формирование управляющих сигналов широтно-импульсной или частотно-импульсной модуляции с учетом сигналов обратной связи по выходному напряжению или току. Это обуславливает определенную схемотехническую сложность таких преобразователей и значительное количество необходимых компонентов, что неизбежно отражается на надежности и стоимости ЗУ и АВСД в целом.

*ЗУ на основе ключевых схем с дозирующими реакторами.* Из известных полупроводниковых импульсных преобразователей напряжения постоянного тока наибольшей простотой схемы и наименьшим количеством ее элементов, а следовательно, и наименьшей стоимостью обладают ЗУ на основе ключевых схем с дозирующими реакторами. Следует отметить, что одно из преимуществ таких ЗУ заключается в постоянстве потребляемой мощности при условии обеспечения полного разряда дозирующих реакторов [1].

Несколько упрощенная электрическая принципиальная схема АВСД с ЗУ, построенным на основе ключевой схемы с дозирующим реактором, приведена на рис. 2, а. В таком ЗУ заряд емкостного накопителя (конденсатор  $C_2$ ) формирующего контура ГИН осуществляется за несколько двухстадийных циклов переключения транзисторного ключа  $VT_1$ .

В первой стадии каждого цикла, на протяжении которой транзисторный ключ  $VT_1$  находится в открытом (включенном) состоянии, происходит аккумуляция энергии в индуктивном накопителе (дросселе)  $L_1$ . Схема замещения ЗУ для этой стадии его работы приведена на рис. 2, б. В течение первой стадии ток  $i_L$  через реактор (дроссель)  $L_1$  и ток  $i_T$  через транзисторный ключ  $VT_1$  нарастают от нуля до амплитудного значения  $I_m$ , а процесс заряда дросселя  $L_1$  для тока  $i_L$  и напряжения  $u_L$  описывается уравнениями [10], решениями которых являются

$$i_L = i_T = \frac{U_{\text{вх}}}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right), u_L = U_{\text{вх}} e^{-\frac{R}{L}t}, \quad (1)$$

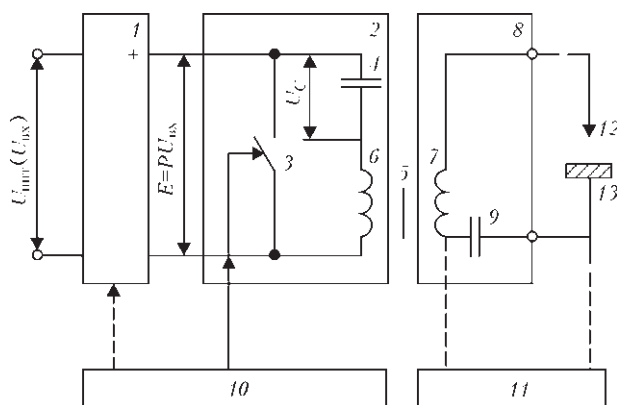


Рис. 1. Структурная схема АВСД: 1 — ЗУ повышающего типа; 2 — ГИН; 3 — входящий в состав ГИН полупроводниковый коммутирующий ключ; 4 — конденсатор формирующего контура ГИН; 5 — импульсный повышающий трансформатор с первичной 6 и вторичной 7 обмотками; 8 — УВВИ в цепь дуги; 9 — защитный (блокировочный) конденсатор УВВИ; 10 — схема управления АВСД; 11 — источник питания дуги; 12 — электрод; 13 — свариваемое изделие

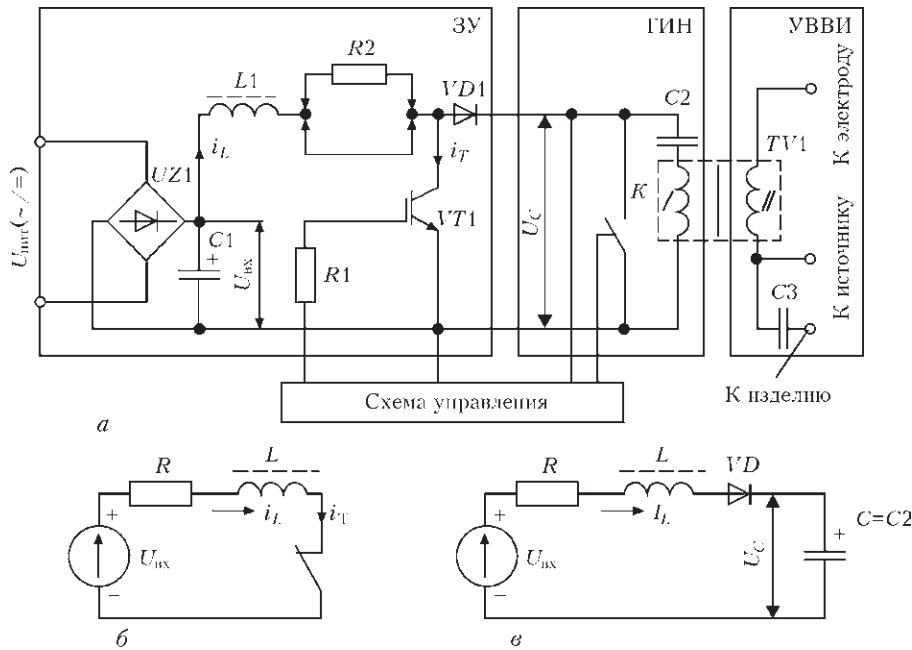


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема ABCD с ЗУ на основе ключевой схемы с дозирующим реактором (а) и схемы замещения ЗУ для интервала времени, соответствующего длительности открытого (б) и закрытого (в) состояния транзисторного ключа ЗУ

где  $U_{вх}$  — напряжение питания постоянного тока (напряжение на конденсаторе  $C1$ );  $R = R_L + ESR_{C1} + R_{к-э} + R_{доп}$  — активное сопротивление цепи заряда дросселя  $L1$ ;  $R_L$  — активное сопротивление дросселя  $L1$ ;  $ESR_{C1}$  — эквивалентное активное последовательное сопротивление конденсатора  $C1$ ;  $R_{к-э}$  — активное сопротивление коллектор-эмиттер транзистора  $VT1$  в его открытом состоянии;  $R_{доп}$  — активное сопротивление дополнительного токоограничивающего резистора ( $R2$ );  $L$  — индуктивность реактора (дросселя)  $L1$ .

Необходимость введения дополнительного токоограничивающего резистора  $R_{доп}$  (рис. 2, а, резистор  $R2$ ) вытекает из того, что, как показано в [1], при его отсутствии условие постоянства потребляемой мощности для первого момента заряда емкостного накопителя (конденсатора  $C2$ ) невыполнимо. Кроме того, поскольку значения  $R_L$  и дифференциального сопротивления диода  $VD1$  в его открытом состоянии (состоянии проводимости) очень малы, то в рассматриваемой схеме ABCD принципиально невозможно обеспечить ограничение тока заряда емкостного накопителя формирующего контура ГИН путем воздействия на управляющий вход транзисторного ключа  $VT1$ . Вместе с тем очевидно, что введение дополнительного токоограничивающего резистора  $R_{доп}$  несколько ухудшает энергетические показатели ЗУ.

Наибольшее (амплитудное) значение тока  $I_m$ , которое достигается при протекании тока  $i_L = i_T$  в интервале времени, соответствующем открытому состоянию транзисторного ключа ЗУ, определяют по соотношению

$$I_m = \frac{U_{вх} D}{L f_{т.к}}, \quad (2)$$

где  $D$  — относительная длительность открытого состояния транзисторного ключа ЗУ в течение периода  $T_{т.к}$  каждого цикла коммутации;  $f_{т.к} = 1/T_{т.к}$  — частота циклов коммутации транзисторного ключа ЗУ.

В начале второй стадии каждого цикла транзисторный ключ  $VT1$  (рис. 2, а) переходит в закрытое состояние и аккумулированная в индуктивном накопителе  $L1$  доза энергии

$$\Delta W = \int_0^{\tau_n} (u_L i_L) dt = LI_m^2 / 2 = \text{const}, \quad (3)$$

где  $\tau_n$  — длительность импульса, в течение которой в дросселе  $L1$  накапливается энергия и начинает поступать в емкостной накопитель ГИН (конденсатор  $C2$ ). Схема замещения ЗУ для второй стадии зарядно-разрядного цикла индуктивного накопителя  $L$  приведена на рис. 2, в.

Для осуществления аккумуляции энергии в индуктивном накопителе  $L$  и его полного разряда в течение второй стадии каждого цикла на частоту  $f_{т.к}$  коммутации транзисторного ключа ЗУ накладывается обоснованное в работе [1] условие

$$f_{т.к} \leq \frac{1}{1,57\sqrt{LC} + LI_m / U_{вх}}, \quad (4)$$

где  $C$  — емкость конденсатора (емкостного накопителя) формирующего контура ГИН.

Так как для ABCD обычно, кроме значения энергии импульсов, заданными являются значения напряжения заряда  $U_{C0}$  емкостного накопителя ГИН (см. рис. 2, а, конденсатор  $C2$ ) и длительность



ность его заряда  $t_3$ , которая должна удовлетворять условию

$$t_3 \leq \frac{1}{f_{и}}, \quad (5)$$

то значение энергии  $W_C$ , накопление которой должно обеспечиваться за интервал времени  $t_3$ , составляет

$$W_C = \frac{CU_{C0}^2}{2} = n\Delta W = \frac{LI^2}{2} t_3 f_{т.к}, \quad (6)$$

где  $f_{и}$  — частота включений коммутирующего ключа ГИН (см. рис. 2, а, ключ  $K$ );  $n = t_3/T_{т.к} = t_3 f_{т.к}$  — количество циклов коммутации транзисторного ключа ЗУ (см. рис. 2, а, транзистор  $VТ1$ ) за интервал времени  $t_3$ .

Из решения известных уравнений с ненулевыми начальными условиями [10, 11] для схемы замещения, приведенной на рис. 2, в, следует, что во второй части цикла в течение длительности импульса полного разряда индуктивного накопителя ЗУ  $\tau_p$  напряжение  $u_L$  на этом накопителе в момент начала  $n$ -го импульса определяется как

$$-u_L = -(U_{C_{n-1}} + U_{ВХ}), \quad (7)$$

где  $U_{C_{n-1}}$  — напряжение на емкостном накопителе ГИН перед началом  $n$ -го импульса, а в момент окончания  $n$ -го импульса по формуле

$$-u_L = -(U_{C_{n-1}} + U_{ВХ}) / e^{-\frac{R}{L}\tau_p}. \quad (8)$$

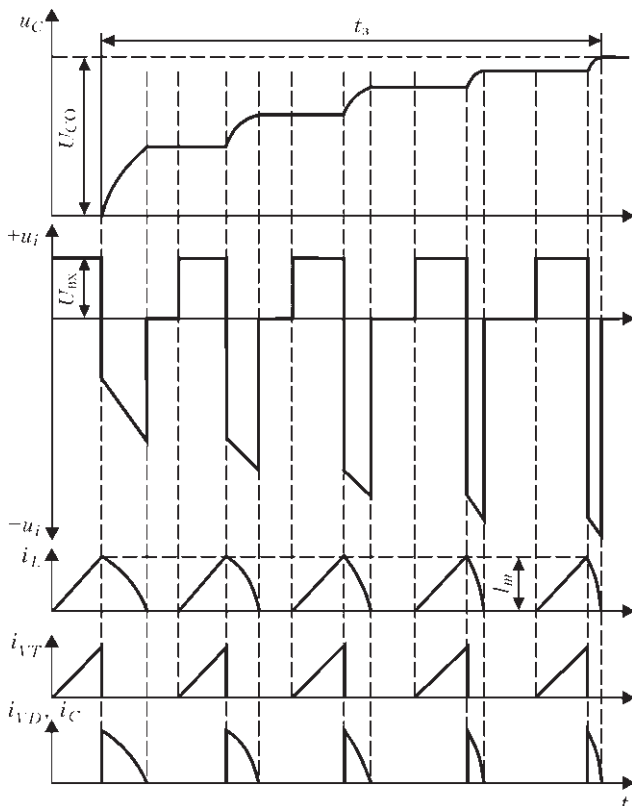


Рис. 3. Эпюры напряжений и токов в цепях ЗУ на основе ключевой схемы с дозирующим реактором

Согласно работе [1] напряжение  $U_{C_{n-1}}$  можно определить по выражению

$$U_{C_{n-1}} = \sqrt{\frac{L}{C(n-1)}}, \quad (9)$$

мгновенное значение тока заряда  $i_C$  емкостного накопителя ГИН для  $n$ -го импульса по формуле

$$i_C(\tau) = I_m (\cos \omega_0 \tau - \sqrt{n-1} \sin \omega_0 \tau), \quad (10)$$

длительность  $\tau_p$  по выражению

$$\tau_p = \sqrt{LC} (1,57 - \arctg \sqrt{n-1}), \quad (11)$$

где  $\tau$  — время, отсчитываемое от момента начала  $n$ -го импульса;  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  — собственная частота  $LCR$ -контура заряда емкостного накопителя ГИН.

На рис. 3 представлены эпюры токов  $i_L$  и  $i_{VT}$ , протекающих через индуктивный накопитель и транзисторный ключ ЗУ соответственно, ток заряда  $i_C$  емкостного накопителя ГИН (ток  $i_{VD}$  через отсекающий диод) и напряжения  $u_C$  на этом накопителе. Из выражений (7)–(11) и рис. 3 вытекает, что по мере повышения напряжения  $u_C$  на емкостном накопителе ГИН длительность  $\tau_p$  импульсов зарядного тока  $i_C$  и разность напряжений  $\Delta U_C = U_{C_n} - U_{C_{n-1}}$  постепенно уменьшаются. Процессы аккумуляции энергии в индуктивном накопителе ЗУ и его полного разряда, повторяющиеся с частотой  $f_{т.к}$ , продолжают до момента, пока напряжение на емкостном накопителе ГИН не достигнет заданного значения  $U_{C0}$ , после чего в ГИН осуществляется разряд (перезаряд) последнего без отключения цепи его заряда. Во избежание заряда емкостного накопителя ГИН до значений напряжения  $U_C$ , превышающих допустимые, в момент прекращения генерации выходных импульсов АВСД напряжение его питания или напряжение  $U_{ВХ}$  должно быть отключено.

Для схемы ЗУ, приведенной на рис. 2, а, действующее значение тока  $I_{п}$ , потребляемого таким АВСД, может быть определено по соотношению

$$I_{п} = \frac{U_{ВХ}}{4,9Lf_{т.к}}, \quad (12)$$

а необходимое для обеспечения заряда емкостного накопителя ГИН амплитудное значение тока  $I_m$  (при заданных значениях  $U_{C0}$  и  $t_3$ ) по выражению

$$I_m = \sqrt{\frac{C}{Lt_3 f_{т.к}}} U_{C0} = \sqrt{\frac{C}{Ln}} U_{C0}. \quad (13)$$

К достоинствам ЗУ, построенным на основе ключевой схемы с дозирующим реактором (см. рис. 2, а), следует отнести практическое отсутствие ограничений по уровню входного напряжения  $U_{ВХ}$  (в большинстве случаев составляющем от 50 до 350 В), а также инвариантность таких ЗУ по роду питающего АВСД напряжения. При этом нормальное функционирование ЗУ при питании





Таблица 1. Расчетные значения запасаемой энергии импульсов (Дж) в зависимости от емкости формирующего контура ГИН

$U_{C0}$ , В	$C$ , мкФ										
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
600	0,278	0,556	0,833	1,111	1,389	1,667	2,222	2,778	3,333	3,889	4,444
650	0,237	0,473	0,710	0,997	1,183	1,420	1,893	2,367	2,840	3,314	3,787
700	0,204	0,408	0,612	0,816	1,020	1,224	1,633	2,041	2,449	2,857	3,265
750	0,178	0,356	0,533	0,711	0,889	1,067	1,422	1,778	2,133	2,489	2,844
800	0,156	0,313	0,469	0,625	0,781	0,938	1,250	1,563	1,875	2,188	2,500

АВСД напряжением переменного тока не зависит от его частоты. Если же для питания АВСД предусматривается использование только напряжения постоянного тока, то наличие в схеме, приведенной на рис. 2, а, выпрямителя  $UZ1$  и буферного конденсатора  $C1$  не является принципиально обязательным.

Вместе с тем на практике в ЗУ, построенных на основе ключевой схемы с дозирующим реактором, существуют определенные ограничения на уровень напряжения полного заряда  $U_{C0}$  емкостного накопителя ГИН, вызванные тем, что рост  $U_{C0}$  неизбежно предопределяет и ужесточает требования к максимально допустимым значениям напряжения коллектор-эмиттер ( $U_{к-э макс}$ ) транзисторного ключа  $VT1$  (см. рис. 2, а) и напряжения на коммутирующем ключе  $K$  формирующего контура ГИН в закрытом состоянии этих ключей, обратного напряжения диода  $VD1$  и напряжений на пассивных элементах АВСД. И хотя достижение высоких уровней  $U_{C0}$  принципиально возможно, исходя из опыта создания и применения АВСД, доступной номенклатуры ключевых полупроводниковых приборов и их стоимостных показателей рекомендуемые значения  $U_{C0}$  составляют от 600 до 800 В.

При заданных значениях запасаемой энергии импульсов  $W_C$ , напряжений  $U_{вх}$  и  $U_{C0}$ , частоты  $f_{и}$  или периода  $T_{и}$  ( $f_{и} = 1/T_{и}$ ) включений коммутирующего ключа ГИН инженерный расчет основных компонентов ЗУ, построенного на основе ключевой схемы с дозирующим реактором, можно выполнить в следующем порядке.

1. Минимально необходимое значение емкости  $C$  формирующего контура ГИН (см. рис. 2, а, емкость конденсатора  $C2$ ) определяют с помощью соотношения (6) и значений, приведенных в табл. 1:

$$C \geq \frac{2W_C}{U_{C0}^2}. \quad (14)$$

В соответствии с ранее проведенными исследованиями и полученными экспериментальными

данными в зависимости от назначения АВСД рекомендуемыми значениями запасаемой энергии импульсов  $W_C$  являются (0,05...0,50) Дж для возбуждителей дуги и (0,20...0,80) Дж для импульсной стабилизации процесса горения дуги переменного тока [2, 3, 12].

По определенным согласно (14) или табл. 1 расчетным значениям емкости конденсатора  $C2$  (см. рис. 2, а) выбирают ближайшее (с округлением в большую сторону) значение из ряда (0,10; 0,15; 0,22; 0,33; 0,47; 0,68; 1,00; 1,50 мкФ). При этом необходимое значение  $C$  может быть получено за счет диссипативного (параллельного) включения двух – четырех конденсаторов с полиэтиленовым или поликарбонатным диэлектриком, характеристики и параметры которых соответствуют рекомендациям, приведенным в [13] (например, конденсаторов серии РРА или РРВ фирмы «ISEL»).

2. С учетом условия (4) и в зависимости от заданных значений частоты  $f_{и}$  или периода  $T_{и}$  ( $f_{и} = 1/T_{и}$ ) включений коммутирующего ключа ГИН (частоты или периода следования выходных импульсов АВСД) и энергии импульсов  $W_C$  принимают значение числа  $n$ , определяющего согласно (7) количество доз энергии  $\Delta W_C$ , накопление которых обеспечивает полный заряд емкостного накопителя ГИН до уровня  $U_{C0}$  за интервал времени  $t_3$ . Рекомендуемые значения  $n$  приведены в табл. 2.

3. Исходя из выражений (2), (5) и (6), выбранного согласно табл. 2 числа  $n = W_C/W_C = t_3/T_{т.к} = t_3 f_{т.к}$ , определяют амплитудное значение протекающего через реактор тока  $I_m$  и относительную длительность  $D$  открытого состояния транзисторного ключа ЗУ. Согласно результатам проведенных исследований и экспериментальным данным в зависимости от заданных значений  $W_C$ ,  $U_{вх}$  или  $U_{C0}$ ,  $f_{и}$  рекомендуемые значения  $I_m$  составляют от 2,2 до 3,2 А, а значения  $D$  — от 0,24 до 0,30, при этом выбираемые в отмеченных диапазонах значения  $I_m$  и  $D$  должны возрастать с увеличением значений  $U_{вх}$  или уменьшением значений числа  $n$ .

Таблица 2. Рекомендуемые значения числа  $n$  в зависимости от  $f_{и}$  и  $W_C$

$f_{и}$ , Гц	$W_C$ , Дж										
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
От 50 до 100	1	2	3	4	5	6	8	8	9	10	10
Свыше 100 до 120	1	2	3	4	5	6	6; 7	8	8	8	8
Свыше 120 до 200	1	2	2	3	3	3; 4	4; 5	5	5	5	5



4. Принимая, что индуктивность дозирующего реактора  $L1$  (см. рис. 2, а) линейна и не зависит от протекающего через реактор тока  $i_L$  и используя рассчитанные или выбранные значения  $I_m$ ,  $n$  и  $D$ , а также заданные значения  $U_{вх}$  и  $W_C$  с учетом (2) определяют  $L$  по выражению

$$L = \frac{U_{вх} D}{I_m^2 f_{т.к}}, \quad (15)$$

а с учетом (6)

$$L = \frac{2W_C}{I_m^2 n}. \quad (16)$$

Графики зависимости  $L = f(U_{вх}, I_m, D, f_{т.к})$  иллюстрирует рис. 4.

Рекомендуемые значения индуктивности дозирующего реактора  $L1$ , вытекающие из табл. 2, диапазона рекомендуемых значений  $I_m$ , выражений (15), (16), а также опыта создания и применения в АВСД ЗУ на основе ключевой схемы с дозирующим реактором, приведены на рис. 5.

Теоретическим основам, анализу процессов и методикам электромагнитного и конструктивного расчетов индуктивных элементов с ферромагнитными сердечниками, в том числе дросселей ультранизких, низких и средних частот, посвящено множество работ, например [14–17], согласно которым по совокупности электромагнитных и массогабаритных показателей для дозирующего реактора ЗУ наиболее рациональной является конструкция броневого типа. Такая конструк-

ция может быть построена на базе сердечников из стандартных Ш-образных пластин или ленточных магнитопроводов из тонколистовой холоднокатаной анизотропной электротехнической стали марок 3411...3414, при этом длина суммарного диамангнитного зазора в сердечнике дозирующего реактора должна составлять (1,05...1,50) мм.

5. После определения индуктивности дозирующего реактора  $L1$  следует уточнить расчетное амплитудное значение тока  $I_m$ , для чего используем выражение (2) или (13).

6. При определении сопротивления  $R$  резистора  $R2$  (см. рис. 2, а) учитывают, что, во-первых, так как  $R_{доп} \gg R_L + ESR_{C1} + R_{ТО}$ , то  $R \approx R_{доп}$ , а, во-вторых, для получения при заряде дозирующего реактора  $L1$  линейной зависимости  $i_L = f(t)$  путем использования начального (практически линейного) участка экспоненты должно выполняться условие

$$L/R > \tau_3. \quad (17)$$

Принимая  $L/R \gg 1/f_{и}$  и с учетом результатов расчетов, экспериментальных данных и рекомендуемых значений  $f_{т.к}$ ,  $I_m$ ,  $U_{C0}$  и  $L$ , рекомендуемые значения сопротивления резистора  $R2$  составляют от 6 до 22 Ом, причем они тем больше, чем больше значение  $U_{вх}$  или чем меньше значение  $f_{т.к}$ .

Большее значение мощности рассеяния  $P_{R2 макс}$ , выделяемой в резисторе  $R2$  в течение первых двух циклов заряда-разряда дозирующего реактора  $L1$ , можно определить по выражению

$$P_{R2 макс} = I_{т.д}^2 R2 = I_m^2 DR2, \quad (18)$$

где  $I_{т.д} = I_T / \sqrt{1/D}$  — действующее значение тока  $i_L$ , протекающего через резистор  $R2$ . Так как с ростом  $U_C$  (см. рис. 3) ток разряда дозирующего реактора  $L1$  в каждом последующем цикле снижается, то к моменту окончания заряда емкостного

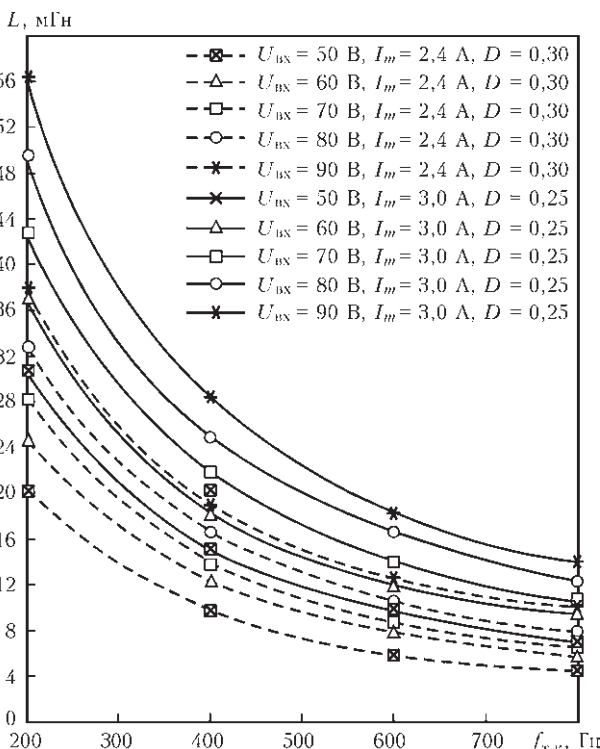


Рис. 4. Графики зависимости индуктивности дозирующего реактора  $L = f(U_{вх}, I_m, D, f_{т.к})$

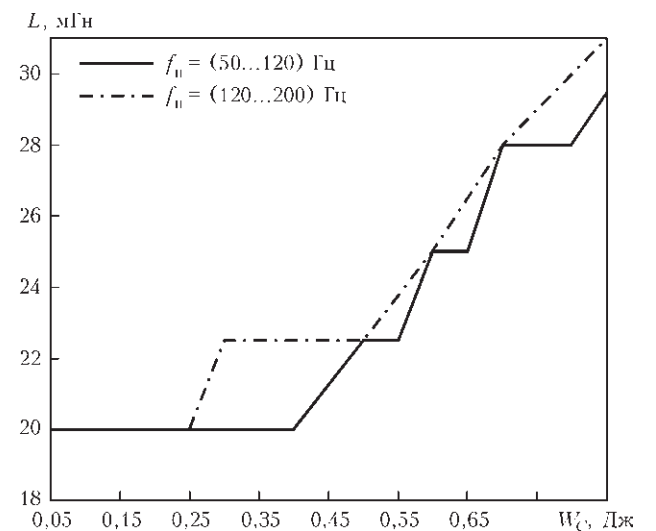


Рис. 5. Рекомендуемые значения индуктивности дросселя ЗУ на основе ключевой схемы с дозирующим реактором при  $U_{C0} = (700 \pm 100)$  В



накопителя ГИН выделяемая в резисторе  $R_2$  мощность  $P_{R_2 \text{ мин}}$  определяется как

$$P_{R_2 \text{ мин}} \approx 0,5I_m^2 DR_2. \quad (19)$$

Из (18) и (19) следует, что среднее значение мощности  $P_{R_2}$ , выделяемой в резисторе  $R_2$ :

$$P_{R_2} \approx 0,75I_m^2 DR_2. \quad (20)$$

Если ABCD предназначен для стабилизации процесса горения дуги переменного тока, то номинальную мощность  $P_{R_2 \text{ ном}}$  резистора  $R_2$  выбираем из условия

$$P_{R_2 \text{ ном}} \geq 1,67P_{R_2}, \quad (21)$$

в случае же применения ABCD только для первоначального возбуждения дуги постоянного тока значение номинальной мощности резистора  $R_2$  может быть существенно снижено по сравнению со значением, рассчитанным согласно (21), и должно составлять (6...10) Вт.

В качестве резистора  $R_2$  целесообразно применять мощные резисторы серии C5–35 или серий SPS, SQZ, SQHG [18].

7. При выборе транзистора ключа ЗУ (см. рис. 2, а, транзистор VT1) исходят из того, что согласно (5) и табл. 2 частота  $f_{ТК}$  переключений этого ключа не превышает 1000 Гц, максимальное значение напряжения коллектор-эмиттер  $U_{К-Э} \approx U_{C0}$ , а максимальное значение тока коллектора  $I_K \approx I_m$ . Из этого следует, что для использования в качестве транзисторного ключа ЗУ наиболее подходят IGBT-транзисторы, у которых

$$U_{К-Э \text{ макс}} \geq 1,2U_{C0}, I_{К \text{ макс}} \geq 1,5I_m, \quad (22)$$

$$I_{К,И, \text{ макс}} \geq 1,15(U_{ВХ}/R),$$

где  $U_{К-Э \text{ макс}}$  — максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер в закрытом состоянии;  $I_{К \text{ макс}}$  и  $I_{К,И, \text{ макс}}$  — максимально допустимый соответственно постоянный и импульсный ток коллектора в открытом состоянии. С учетом (22) для применения в ключе ЗУ могут быть рекомендованы, например, IGBT-транзисторы IRG4BH 20K, IRG4PH 30R, IRG4PH 40KD и им аналогичные фирмы «International Rectifier» [19] или IGW 08T120 фирмы «Infineon», при этом сопротивление резистора  $R_1$  (см. рис. 2, а) в цепи затвора таких транзисторов должно составлять (8...12) Ом.

8. Основными параметрами, по которым выбирают диод VD1 (см. рис. 2, а), являются максимально допустимые значения среднего прямого тока  $I_F$  и обратного напряжения  $U_R$ , а также максимальные значения прямого падения напряжения  $U_F$  и времени обратного восстановления  $t_{rr}$ . При этом параметры диода VD1 должны удовлетворять условиям

$$U_{R \text{ макс}} \geq 1,2U_{C0}, I_{F \text{ макс}} \geq 1,2I_{\text{ср. макс}} \quad (23)$$

где  $I_{\text{ср. макс}}$  — максимальное среднее значение тока заряда емкостного накопителя ГИН, которое может быть определено с помощью выражения

$$I_{\text{ср. макс}} = 0,5I_T D. \quad (24)$$

По совокупности параметров и характеристик для применения в ЗУ может быть использован, например, диод BYV26E фирмы «Vishay Semiconductors» [20].

*ЗУ на основе диодно-конденсаторных умножителей напряжения.* По сравнению с ранее рассмотренным ЗУ на основе умножителей напряжения (УН) характеризуются отсутствием в них индуктивных и управляемых полупроводниковых элементов, существенно меньшими значениями массогабаритных показателей и, следовательно, более высокой удельной мощностью, а также заметно более низкой стоимостью. Несмотря на то что УН известны еще с 30-х годов прошлого столетия и до настоящего времени применяются в телевизионной и медицинской аппаратуре, измерительной технике, приборах ночного видения и многих других областях техники [21], этот класс устройств исследован сравнительно слабо, а работы, посвященные анализу и методике расчета УН, относительно малочислены, например [22, 23], и в основном отражают аспекты работы УН с питанием от источников синусоидального напряжения промышленной частоты. Вместе с тем в последнее десятилетие возобладала тенденция интенсивного развития исследований и разработок, а также расширения применения УН с питанием импульсами высокой частоты от работающих в ключевом режиме инверторов. В ряде работ последнего времени, например [6, 24–26], достаточно строго и подробно рассмотрены и проанализированы аспекты схемотехники, переходные процессы и динамические характеристики таких УН. С учетом этого в настоящей работе целесообразно ограничиться вопросами расчета и выбора элементов УН, которые используются при построении ЗУ ABCD, в частности, для обеспечения первоначального и повторных возбуждений дуги в инверторах для сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов (сварка ТИГ), например, в моделях Master Tig 2500, Master Tig 3500 и других фирмы КЕМРПИ [27].

Среди известных диодно-конденсаторных УН в ABCD наибольшее применение получили устройства, построенные по схеме Кокрофта–Уолтона (схеме асимметричного однофазного однополупериодного УН). К основным достоинствам этой схемы следует отнести простоту ее реализации и возможность использования в любой ступени (каскадов) умножения конденсаторов с рабочим напряжением постоянного тока, не превышающим удвоенное амплитудное значение

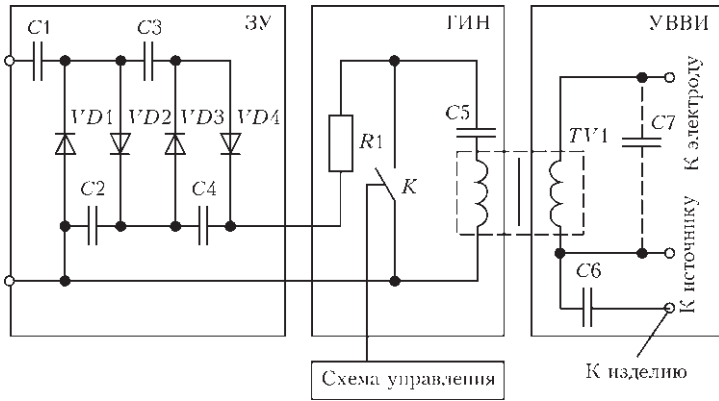


Рис. 6. Типичная электрическая принципиальная схема АВСД с 3У на основе УН, построенного по четырехступенчатой схеме Кокрофта–Уолтона

входного напряжения переменного тока (напряжения питания АВСД), а к недостаткам — ограниченную нагрузочную способность из-за присутствия всем диодно-конденсаторным УН падающей внешней вольт-амперной характеристики (и следовательно, значительное выходное сопротивление  $r_{\text{ВЫХ}}$ ) и зависящего от тока нагрузки и количества ступеней умножения падения напряжения в УН, высокую чувствительность к колебаниям значений входного напряжения и его частоты, а также принципиальную необходимость использования в качестве входного только напряжения переменного тока синусоидальной или прямоугольной формы. В результате проведенных исследований УН на основе схемы Кокрофта–Уолтона [23–26] установлено: значения выходного напряжения постоянного тока  $U_{\text{ВЫХ}}$  практически не зависят от формы входного напряжения переменного тока; характеристики УН улучшаются с повышением частоты  $f_{\text{ВХ}}$  входного напряжения, значения которой должны быть в пределах (5...50) кГц, при этом наиболее оптимальные значения составляют (15...40) кГц; для обеспечения приемлемых характеристик нагрузочной способности УН его мощность должна быть не более 50 Вт, а коэффициент умножения (количество ступеней умножения  $N$ ) составлять от 3 до 6; входное напряжение прямоугольной формы является наиболее тяжелым режимом работы по току для диодов в каскадах УН, поэтому при их проектировании необходимо предусматривать меры по ограничению пусковых токов диодов.

Пример типичной принципиальной электрической схемы АВСД, 3У которого построено на основе четырехкаскадного УН и выполнено по схеме Кокрофта–Уолтона, приведен на рис. 6.

В отрицательный полупериод входного напряжения конденсатор  $C1$  (рис. 6) через открытый диод  $VD1$  зарядится до амплитудного значения этого напряжения  $U_{\text{ВХ.м}}$ . За отрицательным в положительном полупериоде входного напряжения через открытый диод  $VD2$  до уровня  $2U_{\text{ВХ.м}}$  зарядится конденсатор  $C2$ , в следующем за этим отри-

цательном полупериоде через открытый диод  $VD3$  до уровня  $2U_{\text{ВХ.м}}$  зарядится конденсатор  $C3$ , а в очередной положительный полупериод входного напряжения через открытый диод  $VD4$  до уровня  $2U_{\text{ВХ.м}}$  зарядится конденсатор  $C4$ . Таким образом, выходное напряжение постоянного тока в режиме холостого хода УН представляет собой сумму напряжений на последовательно включенных и постоянно подзаряжаемых конденсаторах  $C2$  и  $C4$  и составляет  $4U_{\text{ВХ.м}}$ . Согласно [21–26] в режиме нагрузки при условии неизменности во времени значений входного напряжения  $U_{\text{ВХ.м}}$  и его частоты  $f_{\text{ВХ}}$  выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$ , построенное по схеме Кокрофта–Уолтона УН, определяется по формуле

$$U_{\text{ВЫХ}} = NU_{\text{ВХ.м}} - \frac{I_{\text{Н.Т}}(N^3 + 9N^2/4 + N/2)}{12f_{\text{ВХ}}C_{\text{СТ}}}, \quad (25)$$

где  $I_{\text{Н.Т}}$  — наибольшее значение тока нагрузки УН;  $C_{\text{СТ}}$  — емкость конденсатора каждой ступени умножения при условии  $C_{\text{СТ}} = C1 = C2 = C3 = C4$ . При  $N = 4$  (рис. 6) формула (25) может быть представлена как

$$U_{\text{ВЫХ}} = 4U_{\text{ВХ.м}} - \frac{8,5I_{\text{Н.Т}}}{f_{\text{ВХ}}C_{\text{СТ}}}. \quad (26)$$

Вычитаемое в выражениях (25) и (26) представляет собой падение напряжения  $\Delta U = r_{\text{ВЫХ}}I_{\text{Н.Т}}$  умножителя, откуда значение выходного сопротивления  $r_{\text{ВЫХ}}$  может быть определено по выражению

$$r_{\text{ВЫХ}} = \frac{N^3 + 9N^2/4 + N/2}{12f_{\text{ВХ}}C_{\text{СТ}}}, \quad (27)$$

а при  $N = 4$

$$r_{\text{ВЫХ}} = \frac{8,5}{f_{\text{ВХ}}C_{\text{СТ}}}. \quad (28)$$

Учитывая, что  $f_{\text{ВХ}} \gg f_{\text{и}}$ , а заряд емкостного накопителя ГИН (рис. 6, конденсатор  $C5$ ) осуществляется за множество полных циклов формирования выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  умножителя, можно считать, что в первом приближении ток  $i_C(t)$  и напряжение  $u_C(t)$  заряда емкостного накопителя в течение длительности этого заряда  $\tau_3 \approx 1/f_{\text{и}}$  изменяются по выражениям [10]

$$i_C(t) = I_m e^{-\frac{t}{RC}}, \quad u_C(t) = U_{\text{ВЫХ}}(1 - e^{-\frac{t}{RC}}), \quad (29)$$

где  $I_m$  — наибольшее (амплитудное) значение тока заряда  $i_C(t)$ , соответствующее начальному моменту заряда  $t = 0$  (в который  $u_C(t) = 0$ );  $R = R_{\text{орп}} + ESR_C + R_{L1} \approx R_{\text{орп}}$  — сумма активных сопротивлений токоограничивающего резистора  $R1$  (рис. 6), эквивалентного последовательного сопротивления





конденсатора (емкостного накопителя), формирующего контура ГИН и активного сопротивления первичной обмотки импульсного трансформатора ТВИ. Как и в варианте ЗУ на основе ключевой схемы с дозирующим реактором, при заряде емкостного накопителя ГИН напряжением, формируемым с помощью УН, по мере повышения напряжения  $u_C(t)$  на этом накопителе ток его заряда  $i_C(t)$  уменьшается. Следовательно, значение  $I_{н.т} = I_m = \Delta U / r_{\text{вых}} = NU_{\text{вх.м}} / r_{\text{вых}} + R_{\text{огр}}$  является максимальным и свойствен только первому циклу заряда емкостного накопителя ГИН, а падение напряжения  $\Delta U$  снижается синхронно с уменьшением тока заряда  $i_C(t)$ .

Если принять  $\Delta U = (0,07 \dots 0,10) NU_{\text{вх.м}}$ , что, как показывают результаты расчетов и измерений, практически вполне выполнимо (графики зависимости  $\Delta U = f(N, U_{\text{вх.т}})$  приведены на рис. 7), то в соответствии с (25) и (27)  $I_m$  можно определить по формуле

$$I_m = \frac{(0,07 \dots 0,10) NU_{\text{вх.м}} \cdot 12 f_{\text{вх}} C_{\text{ст}}}{N^3 + 9N^2 / 4 + N / 2}, \quad (30)$$

а  $C_{\text{ст}}$  по формуле

$$C_{\text{ст}} = \frac{I_m (N^3 + 9N^2 / 4 + N / 2)}{(0,07 \dots 0,10) NU_{\text{вх.м}} \cdot 12 f_{\text{вх}}}. \quad (31)$$

Графики зависимостей  $C_{\text{ст}} = f(I_m, U_{\text{вх.м}})$  при  $\Delta U = 0,1 NU_{\text{вх.м}}$  и  $f_{\text{вх}} = 20$  кГц приведены на рис. 8, а графики зависимостей  $C_{\text{ст}} = f(f_{\text{вх}}, I_m)$  при  $\Delta U = 0,1 NU_{\text{вх.м}}$  и  $N = 3, N = 4 \div 5$  — на рис. 9.

При синусоидальной форме входного напряжения УН (напряжения питания АВСД) и допущении, что активное сопротивление цепи заряда конденсатора каждой ступени УН пренебрежительно мало, наибольшее (пиковое) значение  $I_{\text{FSM}}$  и наибольшее среднее значение  $I_{\text{FAV}}$  прямого тока через диод этой ступени умножения с достаточной для практики степенью точности могут быть определены как

$$I_{\text{FSM}} = 12,56 U_{\text{вх.м}} f_{\text{вх}} C_{\text{ст}}, \quad I_{\text{FAV}} = 0,318 I_{\text{FSM}}. \quad (32)$$

При прямоугольной форме входного напряжения УН параметр  $I_{\text{FSM}}$  может быть определен исходя из того, что  $i_C = dU_C / dt$ . Считая, что  $dt = \tau_\phi$ , где  $\tau_\phi$  — длительность нарастания фронта размаха входного напряжения УН, и принимая  $\tau_\phi = 0,04 T_{\text{вх}}$  (что характерно для большинства сварочных инверторов), могут быть определены значения  $I_{\text{FSM}}$  и  $I_{\text{FAV}}$

$$I_{\text{FSM}} = 100 U_{\text{вх.м}} f_{\text{вх}} C_{\text{ст}}, \quad I_{\text{FAV}} = U_{\text{вх.т}} f_{\text{вх}} C_{\text{ст}}. \quad (33)$$

Экспериментально установлено, что при использовании УН в каждом цикле заряда емкостного накопителя ГИН должно выполняться условие

$$0,5 NT_{\text{вх}} < \tau_3 < 0,9 T_{\text{и}}, \quad (34)$$

где  $\tau_3 = (R_{\text{огр}} + r_{\text{вых}}) C = R_3 C$ , откуда

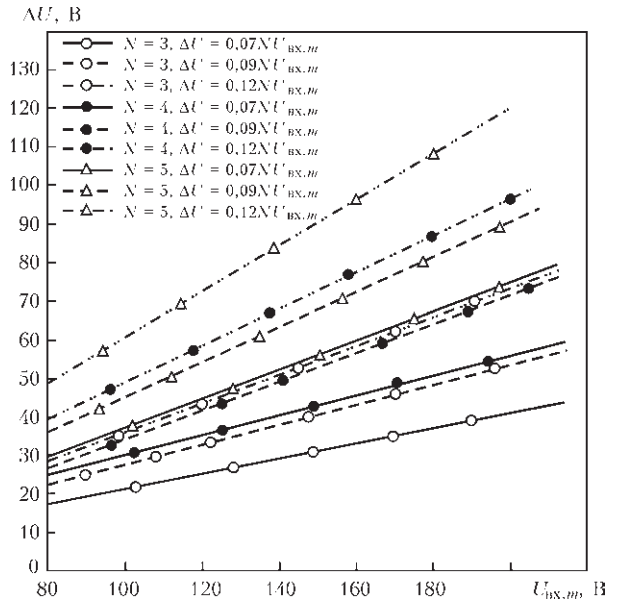


Рис. 7. Графики зависимости падения напряжения  $\Delta U = f(N, U_{\text{вх.м}})$  в УН, построенном по схеме Кокрофта–Уолтона

$$R_3 \leq 0,9 T_{\text{и}} / C. \quad (35)$$

С учетом (27) и (35) сопротивление токоограничивающего резистора  $R_{\text{огр}}$  (см. рис. 6, резистор R1) может быть рассчитано по формуле

$$R_{\text{огр}} \leq \frac{0,9 T_{\text{и}}}{C} - \frac{N^3 + 9N^2 / 4 + N / 2}{12 f_{\text{вх}} C_{\text{ст}}}. \quad (36)$$

Расчет ЗУ на основе УН, построенного по схеме Кокрофта–Уолтона, при заданных значениях энергии импульса  $W_C$ , частоты  $f_{\text{вх}}$  или периода  $T_{\text{вх}}$  входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  ( $f_{\text{вх}} = 1/T_{\text{вх}}$ ) и частоты  $f_{\text{и}}$  или периода  $T_{\text{и}}$  включений коммутирующего ключа ГИН ( $f_{\text{и}} = 1/T_{\text{и}}$ ), выполняют следующим образом.

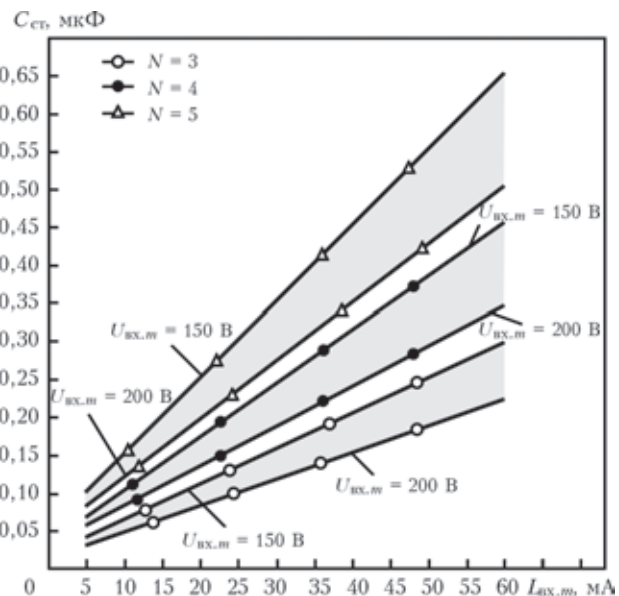


Рис. 8. Графики зависимости  $C_{\text{ст}} = f(I_{\text{т}}, U_{\text{вх.м}}, N)$  емкости каждой ступени УН при  $f_{\text{вх}} = 20$  кГц,  $\Delta U = 0,01 NU_{\text{вх.м}}$

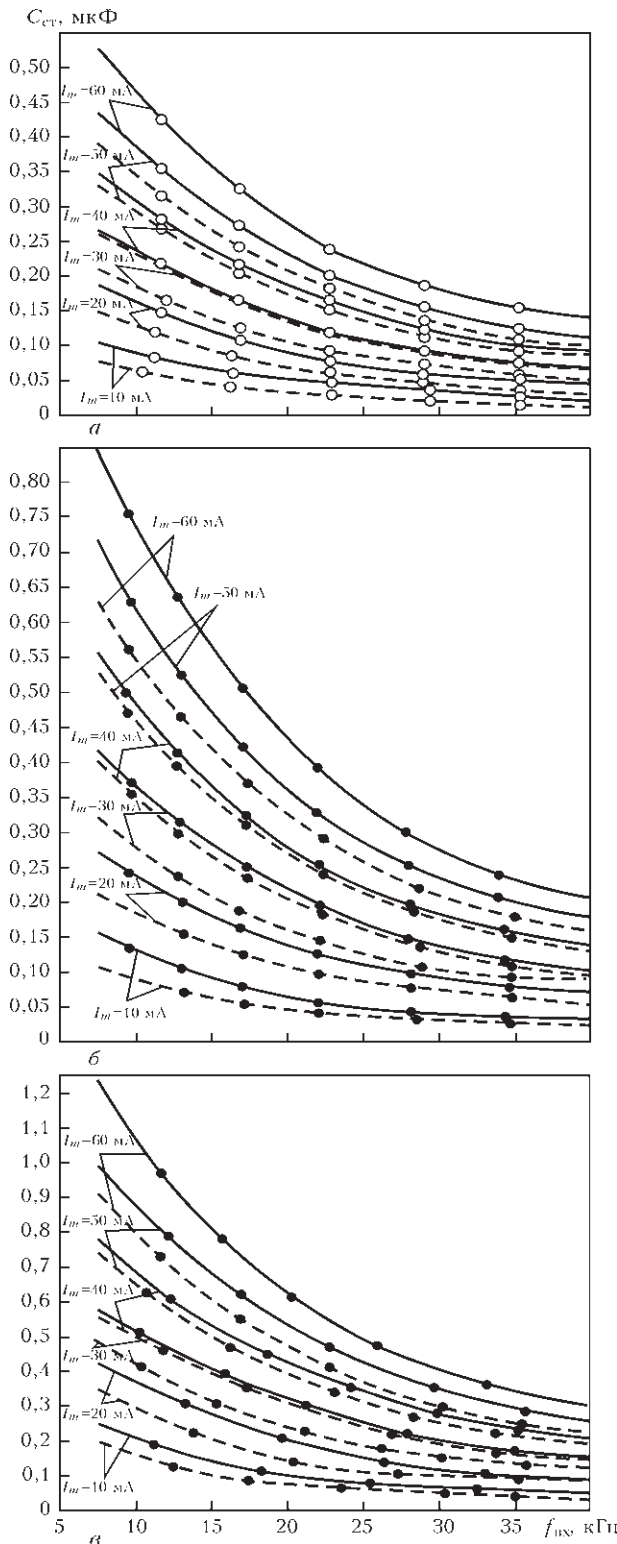


Рис. 9. Графики зависимости  $C_{ст} = f(f_{вх}, U_{вх.м})$  емкости каждой ступени УН при  $N = 3$  (а), 4 (б) и 5 (в): сплошная кривая —  $U_{вх.м} = 150$  В, штриховая — 200

1. Выбирают уровень выходного напряжения УН, рекомендуемые значения которого обычно составляют  $U_{вых} = U_{C0} = (650 \pm 50)$  В.

2. Используя выражение (14) и значения, приведенные в табл. 1, а также рекомендации для ЗУ на основе ключевой схемы с дозирующим реактором, определяют емкость  $C$  формирующего кон-

тура ГИН, количество и конкретный тип образующих эту емкость конденсаторов (см. рис. 6, позиционное обозначение  $C5$ ).

3. Учитывая, что  $U_{C0} = U_{вых} = NU_{вх.м} - \Delta U$  и используя графики, приведенные на рис. 7, определяют количество ступеней умножения  $N$ , амплитуды входного напряжения  $U_{вх.м}$  и допустимого наибольшего падения напряжения  $\Delta U = k_{и} NU_{вх.м}$ . Исходя из рациональных значений электрических и массогабаритных параметров УН, рекомендуемые значения составляют:  $N = 4$ ,  $U_{вх.м} = (160 \dots 190)$  В,  $k_{и} = 0,07 \dots 0,10$ . Если схемотехнические или конструктивные особенности сварочного инвертора не позволяют реализацию рекомендуемых значений  $N$  и  $U_{вх.м}$ , то могут быть использованы и другие их значения с помощью приведенных на рис. 7 графиков зависимости  $\Delta U = f(U_{вх})$  или выражения

$$U_{вых} = NU_{вх.м}(1 - k_{и}). \quad (37)$$

4. Принимая  $N = 3 \div 5$ ,  $U_{вх.м} = (160 \dots 190)$  В,  $\Delta U = 0,1 NU_{вх.м}$  с помощью графиков, приведенных на рис. 8, определяют ориентировочное значение емкости  $C_{ст}$  конденсатора каждой ступени УН при рекомендуемых наибольших значениях  $I_m$  тока заряда емкостного накопителя ГИН, равных (50...60) мА. Если же значения  $N$  или  $f_{вх}$  отличаются от указанных на рис. 8, то для определения значения используют формулу (31), а также данные табл. 3, в которой приведены рекомендуемые значения  $I_m$  и  $R_3$ , рассчитанные с учетом их зависимости от значений  $U_{вых}$ ,  $T_{и} = 1/f_{и}$  и емкости  $C$  формирующего контура ГИН, а также выражений (14), (34) и (35) и значений, указанных в табл. 1.

5. При  $N = 3 \div 5$  по приведенным на рис. 9 графикам уточняют значение  $C_{ст}$  в зависимости от частоты  $f_{вх}$  входного напряжения, которое в большинстве случаев составляет (18...40) кГц. По полученным значениям емкости  $C_{ст}$  (емкости каждого из конденсаторов УН) выбирают ближайшее (с округлением в большую сторону) значение из ряда (0,047; 0,068; 0,1; 0,15; 0,22; 0,33; 0,47; 0,68; 1,00 мкФ), при этом допустимое наибольшее напряжение постоянного тока  $U_{VDC}$  для всех конденсаторов УН должно удовлетворять условию  $U_{VDC} \geq 2,2 U_{вх.м}$ . Предпочтительными являются металлопленочные конденсаторы с полипропиленовым или полиэтилентерефталатным диэлектриком, например, типа MPR или PPN или MER фирмы «HITANO».

6. С учетом определенного значения  $C_{ст}$  и выбранного соответствующего ему типоминерала конденсатора по формуле (30) уточняют расчетное значение  $I_m$ . В случае, если значения  $I_m$  превышают рекомендованные, выбирают типоминерал конденсаторов УН с большей емкостью.

7. Выбор диодов УН осуществляют по таким основным параметрам, как допустимые значения



Таблица 3. Расчетные значения  $I_m$  и  $R_3$  для ЗУ на основе УН

$f_{и}, \text{Гц}$	$0,9T_{и} \cdot 10^2, \text{с}$	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$C, \text{мкФ}$	$R_3, \text{кОм}$	$I_m, \text{А}$
50	1,8	600	0,5...1,5	12,00	0,050
			1,5...2,0	9,00	0,056
			3,0	6,00	0,100
			4,0	4,50	0,133
		650	0,5...1,5	12,00	0,054
			1,5...2,0	9,00	0,062
			3,0	6,00	0,108
			4,0	4,50	0,144
		700	0,5...1,5	12,00	0,058
			1,5...2,0	9,00	0,066
			3,0	6,00	0,117
			4,0	4,50	0,177
100	0,9	600	0,5...1,5	9,00	0,056
			1,5...2,0	4,50	0,133
			3,0	3,00	0,200
			4,0	2,25	0,266
		650	0,5...1,5	9,00	0,062
			1,5...2,0	4,50	0,144
			3,0	3,00	0,217
			4,0	2,25	0,290
		700	0,5...1,5	9,00	0,066
			1,5...2,0	4,50	0,156
			3,0	3,00	0,233
			4,0	2,25	0,311
200	0,45	600	0,5...1,5	12,00	0,133
			1,5...2,0	9,00	0,266
			3,0	6,00	0,400
			4,0	4,50	0,530
		650	0,5...1,5	12,00	0,144
			1,5...2,0	9,00	0,290
			3,0	6,00	0,433
			4,0	4,50	0,575
		700	0,5...1,5	12,00	0,156
			1,5...2,0	9,00	0,311
			3,0	6,00	0,467
			4,0	4,50	0,620

среднего прямого тока  $I_{FAV \text{ макс}}$  и обратного напряжения  $U_{R \text{ макс}}$ , а также максимальные значения прямого падения напряжения  $U_F$  и времени обратного восстановления  $t_{rr}$ . При этом параметры диодов должны удовлетворять условиям

$$I_{FAV \text{ макс}} \geq 1,2 I_{FAV}, \quad (38)$$

где  $I_{FAV}$  — наибольшее среднее значение прямого тока через диод, рассчитанное по выражениям (32) и (33), в зависимости от формы входного напряжения, и

$$U_{R \text{ макс}} \geq 2,2 U_{\text{вх.м}}, \quad (39)$$

а также  $U_F \leq 1,6 \text{ В}$ , а  $t_{rr} \leq 100 \text{ нс}$ .

По совокупности параметров и характеристик для применения в УН АВСД могут быть использованы, например, диоды VS-20ETF04FPPbF или VS-20ETF06FPPbF фирмы «Vishay Semiconductors» [20] или MURF1660CTG фирмы «ON Semiconductor» [28].

8. С помощью формулы (36) рассчитывают сопротивление токоограничивающего резистора  $R_{огр}$  (см. рис. 6, резистор  $R1$ ). Наибольшее значение мощности рассеяния  $P_{R_{огр \text{ макс}}}$ , выделяемой в резисторе  $R_{огр}$  в течение первых одного-двух циклов заряда емкостного накопителя ГИН, может быть рассчитано по выражению

$$P_{R_{огр \text{ макс}}} = (I_{C \text{ RMS}})^2 R_{огр} = 0,25 I_m^2 R_{огр}, \quad (40)$$

где  $I_{C \text{ RMS}} = \sqrt{1/T_{и} \int_0^{T_{и}} i_C(t)^2 dt} = 0,5 I_m$  — среднеквадратичное (действующее) значение тока заряда при аппроксимации экспоненциального видеоимпульса тока заряда видеоимпульсом треугольной формы. Поскольку с повышением напряжения  $u_C(t)$  на емкостном накопителе ГИН ток  $i_C(t)$  его заряда снижается и к моменту окончания заряда практически равен нулю, то среднее значение мощности  $P_{R_{огр}}$ , выделяемой в резисторе  $R_{огр}$ , в течение длительности заряда емкостного накопителя ГИН, может быть определено как

$$P_{R_{огр}} \approx 0,5 P_{R_{огр \text{ макс}}}. \quad (41)$$

Если АВСД предназначен для стабилизации процесса горения дуги переменного тока, то номинальная мощность  $P_{R_{огр \text{ ном}}}$  резистора  $R_{огр}$  должна выбираться из условия

$$P_{R_{огр \text{ ном}}} \geq 1,43 P_{R_{огр}}, \quad (42)$$

а если АВСД предназначен только для возбуждения дуги постоянного тока значение  $P_{R_{огр \text{ ном}}}$  может быть существенно снижено по сравнению с расчетным и составлять (2...8) Вт.

В качестве резистора  $R_{огр}$  могут применяться резисторы серий С2-22-2 или С2-33-2 при  $PR_{огр} \leq 3 \text{ Вт}$  или серий SPS, SQZ, SQHG [18] при  $PR_{огр} \geq 3 \text{ Вт}$ .

### Выводы

1. Для АВСД, встроенных в сварочные источники питания, которые содержат звено высокочастотного преобразования и, следовательно, высокочастотный трансформатор, весьма эффективным представляется применение ЗУ на основе УН в силу простоты реализации и наименьших значений массогабаритных и стоимостных показателей подобных устройств по сравнению с ЗУ других типов. Однако использование ЗУ на основе УН целесообразно при уровнях энергии импульсов АВСД, не превышающих 0,25 Дж, напряжении заряда емкостного накопителя ГИН не более 700 В, амплитудных значениях входного напряжения (напряжения питания АВСД) от 150 до 200 В частотой (18...40) кГц.

Характерная особенность ЗУ на основе УН заключается в том, что для их функционирования





принципиально необходимо питание напряжением переменного тока. При этом форма входного напряжения (напряжения питания АВСД) практически не влияет на выходные характеристики и параметры ЗУ, однако существенно влияет на токи, протекающие через диоды УН. Область применения АВСД с ЗУ на основе УН ограничивается инверторными источниками питания, преимущественно для сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов (сварка ТИГ).

2. ЗУ на основе ключевой схемы с дозирующим реактором по массогабаритным и стоимостным показателям уступают ЗУ на основе УН, но вместе с тем в сравнении с последними обладают рядом важных преимуществ. ЗУ на основе ключевой схемы с дозирующим реактором не зависят от рода напряжения питания АВСД и способны функционировать при питании напряжением как постоянного, так и переменного тока синусоидальной или прямоугольной или близкой к ним формы частотой от десятков герц (в том числе 50 Гц) до десятков килогерц. Для таких ЗУ практически отсутствуют ограничения как по уровню входного напряжения, который может быть в диапазоне от нескольких до сотен вольт, так и по технологически обоснованным уровням энергии импульсов АВСД, которые могут составлять от 0,01 до 1,00 Дж и более, при этом существует возможность обеспечения стабилизации заданных значений напряжения заряда емкостного накопителя ГИН. Они имеют широкую область применения при дуговой и плазменной сварке и могут быть использованы в традиционных источниках питания и сварочных системах и источниках питания инверторного типа. Такие АВСД могут быть эффективно применены и при ручных способах дуговой и плазменной сварки и в сварочных автоматах, в частности, в одно- и многопостовых системах автоматической орбитальной сварки неплавящимся электродом стыков трубопроводов [29].

3. В результате выполненного анализа и с учетом опыта разработки, проектирования, изготовления и эксплуатации АВСД разработана инженерная методика расчета ЗУ на основе ключевой схемы с дозирующим реактором и ЗУ на основе УН, а также выработаны практические рекомендации по выбору их элементной базы, что может быть полезным не только при разработке АВСД, но и других подобных устройств, предназначенных для использования в различных отраслях науки и техники.

1. *Пентегов И.В.* Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – Киев: Наук. думка, 1982. – 424 с.
2. *Оборудование для дуговой сварки:* Справ. пособие / Под ред. В.В. Смирнова. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 656 с.
3. *Темкин Б.Я.* Теория и расчет возбудителей сварочной дуги: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1981. – 16 с.

4. *Пат. RU 2127482 C1.* Способ возбуждения колебаний в электрическом контуре и устройстве для его осуществления / С.В. Балакин. – Оpubл. 10.03.1999.
5. *Моин В.С., Латтев Н.Н.* Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергия, 1972. – 512 с.
6. *Готтлиб И.М.* Источники питания. Инверторы, конвертеры, линейные и импульсные стабилизаторы / Пер. с англ. под ред. С.А. Лужанского. – М.: Постмаркет, 2002. – 544 с.
7. *Северис Р., Блум Г.* Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания / Пер. с англ. под ред. Л.Е. Смольникова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 294 с.
8. *Поликарпов А.Г.* Импульсные регуляторы постоянного напряжения для вторичных источников питания // Тр. Моск. энергет. ин-та. – 1975. – Вып. 275. – С.69–75.
9. *He Y., Luo F.L.* Analysis of Luo converters with voltage-lift circuit // IEE Proc. Electr. Power Appl. – 2005. – 152, № 5. – P. 1239–1252.
10. *Теоретические основы электротехники: Справочник по теории электрических цепей /* Под ред. Ю.А. Бычкова, В.М. Золотницкого, Э.П. Чернышева. – СПб.: Питер, 2008. – 349 с.
11. *Левинштейн Л.М.* Операционное исчисление в задачах электротехники. – Л.: Энергия, 1972. – 360 с.
12. *Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги /* Б.Е. Патон, И.И. Заруба, В.В. Дыменко, А.Ф. Шатан. – Киев: Екотехнологія, 2007. – 218 с.
13. *Махлин Н.М., Коротынский А.Е.* Анализ и методика расчета электронных устройств последовательного включения для бесконтактного возбуждения дуги // Автомат. сварка. – 2014. – № 1. – С. 34–44.
14. *Баев Е.Ф., Фоменко Л.А., Цымбалюк В.С.* Индуктивные элементы с ферромагнитными сердечниками. – М.: Сов. радио, 1976. – 143 с.
15. *Малогабаритные трансформаторы и дроссели: Справочник /* Под ред. И.Н. Сидорова, В.В. Мукосеева, А.А. Христинина. – М.: Радио и связь, 1985. – 416 с.
16. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей: Справ. книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
17. *Справочник по электротехническим материалам /* Под ред. Ю.В. Коричко, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – Т.3. – 728 с.
18. <http://www.dart.ru/cataloguenewresistors/ty/html/cement.shtml>
19. <http://www.irf.com>
20. <http://www.vishay.com>
21. *Садченко Д.* Умножители напряжения // Радио. – 2000. – № 10. – С. 31–33.
22. *Балабух А.И.* Источники питания с умножителями напряжения для электронно-лучевой технологии // Изв. вузов СССР. Электромеханика. – 1984. – № 9. – С. 113–117.
23. *Костиков В.Г., Никитин И.Е.* Источники электропитания высокого напряжения РЭА. – М.: Радио и связь, 1986. – 200 с.
24. *Блинов Ю.И., Балабух А.И., Васильев А.Г.* Влияние формы напряжения входного источника на режим работы умножителя напряжения // Изв. СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Электромеханика. – 2004. – Вып. № 1. – С. 54–56.
25. *Хречков Н.Г.* Динамические характеристики умножителей напряжения высоковольтных электротехнических систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 2006. – 16 с.
26. *Царицаивили А.А.* Особенности работы умножителя напряжения при питании напряжением различной формы и частоты // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2014. – URL: <http://www.online-electric.ru/articles>
27. <http://www.kemppi.com>
28. <http://www.onsemi.com>
29. *Одно- и многопостовые системы для автоматической сварки неповоротных стыков трубопроводов атомных электростанций /* Н.М. Махлин, А.Е. Коротынский, В.А. Богдановский и др. // Автомат. сварка. – 2011. – № 11. – С. 34–44.