

# ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ С МАЛЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПУЛЬСАЦИЙ ДЛЯ ИНЖЕКТОРА ПРОТОНОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

Г.А. Кривоносов, И.Н. Онищенко  
 НИЦ “Харьковский физико-технический институт”  
 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, Украина;  
 E-mail: [onish@kipt.kharkov.ua](mailto:onish@kipt.kharkov.ua)

Исследуются электрические схемы питания с малыми пульсациями, предназначенные для зажигания и горения самостоятельного газового разряда, для вытягивания протонов из разряда и для их фокусировки. Приводятся несколько схемных решений таких источников питания. Даются рекомендации по их применению.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В технологическом ускорителе протонов применяется инжектор с самостоятельным газовым разрядным источником заряженных частиц. Протоны из такого разряда под действием высокого вытягивающего и фокусирующего напряжений инжектируются в ускоритель. К инжектируемым протонам предъявляются высокие требования относительно разброса по энергии. Поэтому на устройства, обеспечивающие электрическое питание инжектора, накладываются требования минимальных пульсаций, не превышающих 2...3%. Работу инжектора обеспечивают три источника питания электрическим током: источник питания самостоятельного газового разряда с напряжением зажигания разряда  $U_z=1500$  В и током дуги  $I_z=0.5...1$  А, источник питания фокусировки с напряжением  $U_f=50$  кВ и током  $I_f=0.5$  мА и источник питания вытягивания с напряжением  $U_e=100$  кВ и током  $I_e=0.05$  А. В работе рассмотрены схемы таких источников питания с предъявляемыми требованиями на величину пульсаций.

## 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ДЛЯ ПИТАНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Особенность самостоятельного разряда заключается в том, что переход от аномального тлеющего

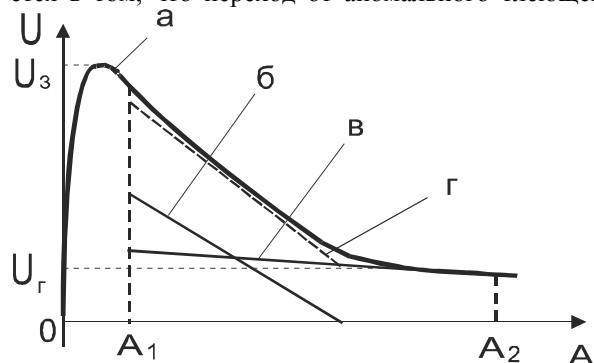


Рис. 1  
 Рис. 1.

разряда к дуге происходит скачкообразно, причём вольт-амперная характеристика из растущей становится падающей (рис.1, кривая *a*). Нелинейная зависимость тока от напряжения накладывает определённые условия на схемное решение источника электрической энергии. Если применить традиционную схему (см. рис.2,а), когда в цепи выпрямителя стоит балластный резистор  $R_I \neq 0$ , а тиристоры  $T_1$  и  $T_2$  открыты, то работа источника питания, выполненного по такой схеме, характеризуется графиком изменения напряжения от времени рис.2,а. В этом случае: коэффициент пульсации на нагрузке  $R_n$  около 11% (коэффициент пульсации определяется отношением разности действующего значения и среднего значения токов к среднему значению тока) [1]. КПД выпрямительного устройства не лучше 60%. Изменением величины  $R_I$  возможно получить режим работы источника питания близким к режиму, характеристика которого отображена на рис.1 кривой *a* в пределах тока от  $A_1$  до  $A_2$ . Однако, работа источника питания при токе в области  $A_2$  неустойчива. Кроме того, при большой величине  $R_I$  КПД понижается, а включение во вторичной цепи сглаживающего ёмкостного фильтра приводит к выходу из строя некоторых элементов источника питания.

Для случая, когда  $R_I=0$  и ток регулируется тиристорами  $T_1$  и  $T_2$  график изменения напряжения от времени при полузакрытых тиристорах показан на рис.2,б. Коэффициент пульсации увеличивается до 20%, КПД возрастает до 90% (сравнительно низкое значение КПД объясняется тем, что трансформатор работает в режиме импульсной нагрузки). Режим горения дуги становится неустойчивым из-за больших времён отсутствия напряжения между импульсами. В этом случае применение схемы рис.2,а для самостоятельного газового разряда не удовлетворяет условиям стабильности ускоренных протонов.

Кривую *a* рис.1 на отрезке от  $A_1$  до  $A_2$  представим в виде ломаной линии *г*, состоящей из суммы двух прямых *б* и *в*. Параметры прямых *б* и *в* можно подобрать такими, что ломаная линия *г* в некотором приближении может отображать характер поведения кривой *a*. Тогда источник питания самостоятельного газового разряда можно выполнить из двух источни-

ков питания, каждый из которых имеет линейные вольт-амперные характеристики. Рассмотрим работу источника питания, выполненного по предлагаемой схеме рис.2,б. Когда тиристоры  $T_1$  и  $T_2$  закрыты, схема работает в режиме двух-полупериодного вы-

прямления. Характер изменения напряжения от времени такого источника соответствует кривой 1 рис.2,в, а её вольт-амперная характеристика соответствует линейной зависимости прямой в рис.1.

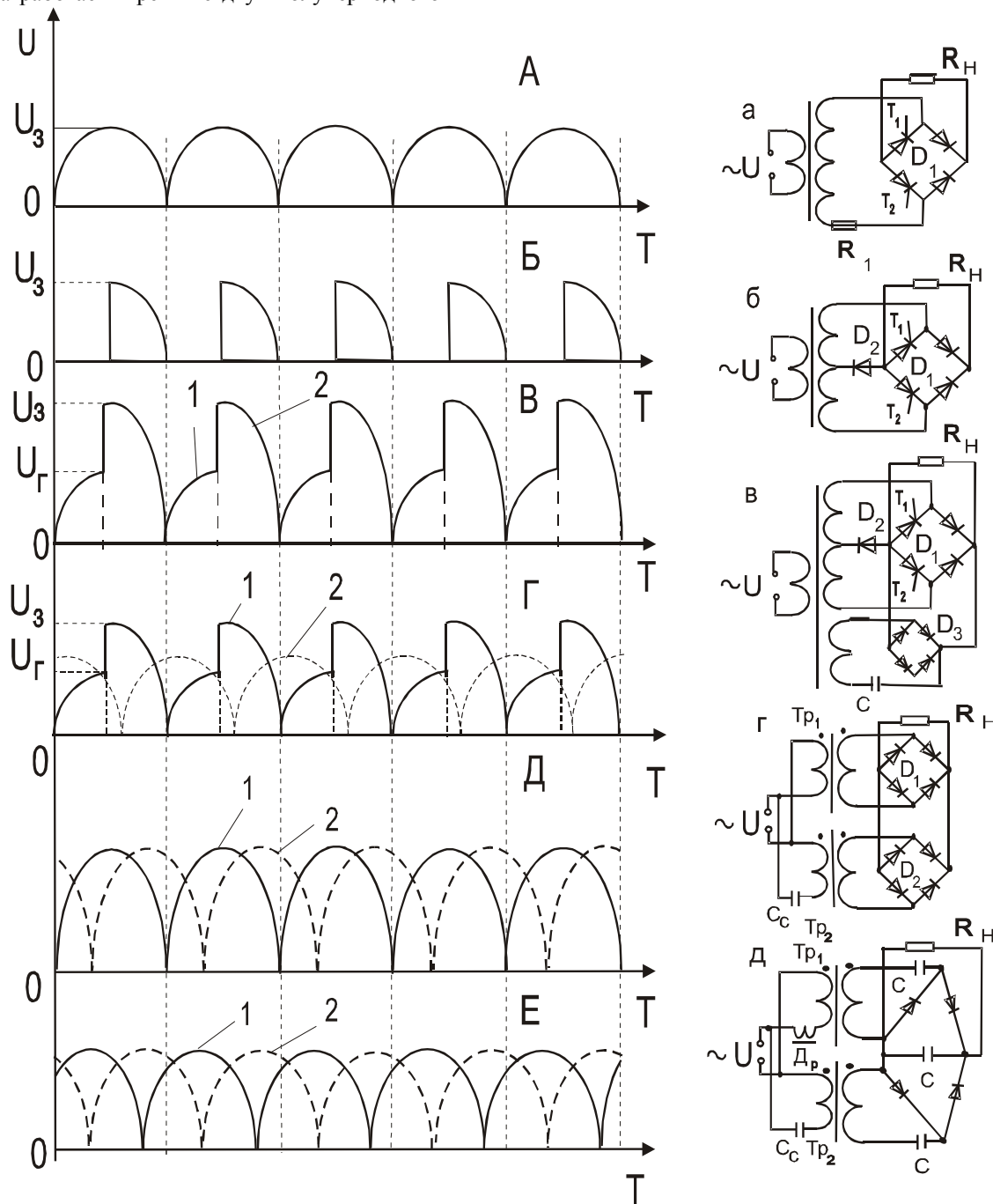


Рис. 2

В случае полупроводниковых тиристоров  $T_1$  и  $T_2$  схема работает в режиме моста, характер изменения напряжения от времени соответствует кривой 2 рис.2,в, а её вольт-амперная характеристика соответствует линейной зависимости прямой б рис.1. В этом случае коэффициент пульсации находится в пределах 4...5%, КПД достигает значения 97%.

С целью уменьшения коэффициента пульсации рассмотрим работу источника питания, выполненного по предлагаемой схеме рис.2,в. Эта схема отли-

чается от выше рассмотренной тем, что в дополнительной цепи последовательно диодным мостом  $D_3$  включена ёмкость  $C$ , и это обуславливает наличие сдвига фаз между напряжением и током. Углы сдвига фаз в цепях можно записать в следующем виде:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 =$$

$$\arctg(U_{L1} / U_{a1}) - \arctg((U_{L2} - U_C) / U_{a2}), \quad (1)$$

где  $U_{L1,2}$  – падение напряжения на индуктивных сопротивлениях вторичных обмоток трансформатора,

$U_c$  – падение напряжения на ёмкостном сопротивлении,  $U_{1,2}$  – падение напряжения на омических сопротивлениях обмоток трансформатора и диодных мостов. На рис.2,г показаны графики изменения напряжения от времени на нагрузке  $R_n$ : сплошная кривая 1 соответствует падению напряжения на нагрузке источника с диодом  $D_2$  и диодным мостом  $D_1$ , штриховая кривая 2 – с диодным мостом  $D_3$  и ёмкостью  $C$ . Расчёты по формуле (1) показывают, что при небольших значениях ёмкости около 150 мкФ и сопротивлении в нагрузке около 1 кОм сдвиг по фазе достигает десятков градусов. Коэффициент пульсации в таком случае имеет величину около 2...3%.

### 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПИТАНИЯ ДЛЯ ВЫТЯГИВАНИЯ И ФОКУСИРОВКИ

Источники питания для вытягивания и фокусировки пучка протонов характеризуются тем, что они на выходе имеют высокие напряжения (в пределах от 50 до 100 кВ) и питают устройства с большим входным сопротивлением – несколько десятков мегаом. На практике используются высоковольтные трансформаторы промышленной частоты с последующим выпрямлением или умножением напряжения (коэффициент пульсации на нагрузке больше 10%). Фильтрация такого напряжения крайне затруднена, так как необходимо иметь конденсаторы большой ёмкости на высокие напряжения, а применение дросселей во вторичной обмотке не рационально из-за малых токов. Возможно выполнить источник питания на повышенной частоте, но появляется задача выполнения мощного (около 6 кВт) преобразователя с высоковольтным трансформатором. Изготовление такого трансформатора требует решения ряда технологических задач по обеспечению изоляции вторичной обмотки.

Для питания фокусировки предлагается схема рис.2,г, которая реализуется из двух стандартных трансформаторов на 50 кВ. Входы трансформаторов  $Tr_1$  и  $Tr_2$  соединены согласовано. Последовательно первичной обмотке трансформатора  $Tr_2$  включена ёмкость  $C_c$ , которая осуществляет сдвиг фаз. К выходам обоих трансформаторов подключены диодные мосты  $D_1$  и  $D_2$ , выходы которых включены со- полюсно с нагрузкой  $R_n$ . На рис.2,д показан характер изменения напряжения от времени: кривая 1 –

для трансформатора  $Tr_1$  с диодным мостом  $D_1$ , кривая 2 – для трансформатора  $Tr_2$  с диодным мостом  $D_2$ . Рассчитанный по (1) коэффициент пульсации с ёмкостью  $C_c$  равной 200 мкФ составляет несколько процентов.

Особенность источника питания вытягивания обусловлена тем, что необходимо иметь напряжение 100 кВ и ток 0.05 А. Мощность такого источника питания должна быть не меньше 6 кВт и коэффициент пульсации не хуже 2%. Как уже отмечалось, источники питания, выполненные по стандартным схемам, не удовлетворяют требованиям стабильности пучка протонов.

Предлагается схема рис.2,д. Для выполнения источника питания вытягивания применяются два серийных трансформатора на промышленной частоте с напряжением 50 кВ на вторичной обмотке. Входы трансформаторов  $Tr_1$  и  $Tr_2$  соединены согласованно. В цепь первичной обмотки  $Tr_1$  последовательно включен дроссель  $D_p$  с индуктивностью  $L=0.5$  Гн, а в цепь первичной обмотки трансформатора  $Tr_2$  включена ёмкость  $C_c = 400$  мкФ. Вторичные обмотки трансформаторов включены со- полюсно и соединены со схемой удвоения. Наличие дросселя и ёмкости в первичных цепях трансформаторов обуславливает сдвиг фаз. На рис.2,е показаны зависимости напряжения от времени: кривая 1 соответствует выходному напряжению трансформатора с индуктивностью в цепи первичной обмотки, а кривая 2 – с ёмкостью. Расчёты по формуле (1) показывают, что при этих значениях ёмкости и индуктивности сдвиг фаз достигает десятков градусов. Коэффициент пульсации в таком случае имеет величину около 2...3%.

Таким образом, источники питания, выполненные по предложенным схемам, позволяют обеспечить электрической энергией инжектор с необходимым коэффициентом пульсации и КПД.

Авторы выражают благодарность Н.П. Гладкому за плодотворные дискуссии при обсуждении содержания статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. М.И. Кузнецов. *Основы электротехники*. М.: «Профтехиздат», 1960.

### POWER SOURCES WITH SMALL PULSATION COEFFICIENT FOR PROTON INJECTOR OF TECHNOLOGICAL ACCELERATOR

*G.A. Krivosov, I.N. Onishchenko*

The electrical circuits of power supply with small pulsations destined for igniting and firing of self-consistent gas discharge, for extracting protons from an arc discharge and for protons focusing have been investigated. Some circuits solution for such power sources are represented. The recommendations for their applications are given.

### ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ З МАЛИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ПУЛЬСАЦІЙ ДЛЯ ІНЖЕКТОРА ПРОТОНІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРИСКОРЮВАЧА

*Г.О. Кривоносов, І.М. Онищенко*

Досліджуються електричні схеми живлення з малими пульсаціями, які призначені для запалення та горіння самостійного газового розряду, для екстракції протонів із розряду та для їх фокусування. Приводяться декілька схемних рішень таких джерел живлення. Даються рекомендації по їх використанню.