

ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ СЕРИИ ИЛУ НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ

© 2021 г. В. В. Безуглов^а, А. А. Брызгин^а, А. Ю. Власов^{а,*}, Л. А. Воронин^а,
М. В. Коробейников^а, С. А. Максимов^а, А. В. Пак^а, В. М. Радченко^а,
А. В. Сидоров^а, В. О. Ткаченко^а, Е. А. Штарклев^а

^а Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

*e-mail: alexandr.vlasov8614@gmail.com

Поступила в редакцию 07.08.2020 г.

После доработки 27.08.2020 г.

Принята к публикации 28.08.2020 г.

Описан импульсный источник питания на основе емкостных накопителей с частичным разрядом для высокочастотных импульсных линейных ускорителей электронов типа ИЛУ. Максимальное выходное импульсное напряжение источника составляет 36 кВ при токе нагрузки до 250 А и длительности импульса до 1 мс, частота повторения импульсов – до 100 Гц. Источник построен по относительно простой модульной схеме и состоит из десяти последовательно включенных модулей. Собран и испытан с подключением нагрузки один модуль. Схема обеспечивает равномерное потребление тока по всем фазам питающей трехфазной сети 380 В.

DOI: 10.31857/S0032816221010250

1. ВВЕДЕНИЕ

Высокочастотные импульсные линейные ускорители типа ИЛУ начали разрабатывать и поставлять в промышленность еще в 70-е годы прошлого века. Десятки ускорителей серии ИЛУ на протяжении десятилетий работают в исследовательских центрах, применяются в промышленности как в России, так и в других странах [1].

За несколько десятилетий было разработано несколько моделей ускорителей ИЛУ [2] на разные уровни энергии и мощности. При этом принципиальная схема системы питания ускорителей оставалась неизменной – стандартной для большинства импульсных высокочастотных ускорителей, а именно накопление энергии в дросселе, резонансный заряд формирующей линии с последующим ее разрядом на нагрузку (высокочастотный (в.ч.) генератор) через повышающий трансформатор. С развитием ускорителей ИЛУ их максимальная энергия и мощность пучка существенно выросли.

Используемый в настоящее время импульсный источник питания обеспечивает работу ускорителя ИЛУ-10 с энергией 5 МэВ и мощностью пучка до 50 кВт. В связи с дальнейшим планируемым ростом мощности ускорителей появилась необходимость в коренной модернизации системы питания с целью увеличения ее выходной мощности, а также перехода на новую современ-

ную элементную базу, поскольку старые радиокомпоненты постепенно снимают с производства, в результате чего необходимо искать какие-либо аналоги или модернизировать отдельные узлы схемы. Кроме того, требуется обеспечить равномерное потребление тока от каждой фазы сетевого трансформатора, поскольку предыдущая система питания не обеспечивала этого, что приводило к необходимости выбирать питающий сетевой трансформатор гораздо большей мощности.

2. ОБЩАЯ СХЕМА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ И ПРИНЦИП ЕГО РАБОТЫ

Для ускорителей серии ИЛУ была разработана новая система питания на основе емкостных накопителей с частичным разрядом [3], состоящая из десяти последовательно включенных одинаковых модулей с регулируемым выходным напряжением до 3.6 кВ. Каждый модуль содержит трехфазный выпрямитель, емкостный накопитель, коммутирующие ключи, а также управляющие и защитные системы.

Питание модулей осуществляется через трехфазный повышающий трансформатор мощностью 300 кВт, который питается от сети 380 В. Его вторичная обмотка состоит из десяти изолированных секций.

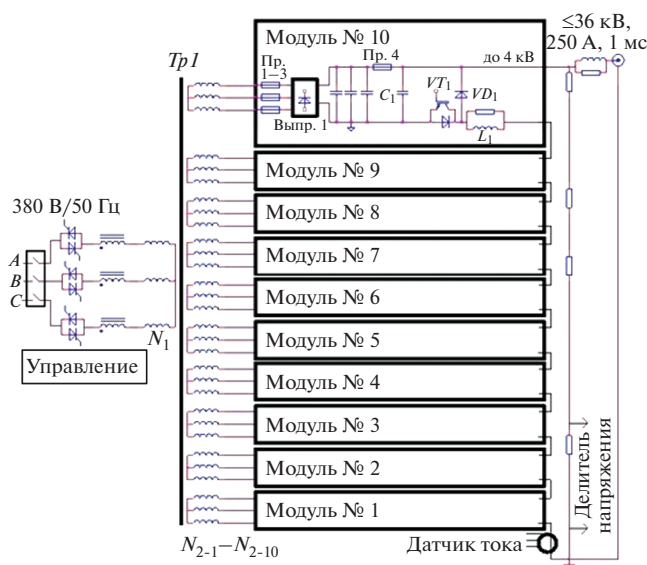


Рис. 1. Функциональная схема импульсного источника питания на основе емкостных накопителей.

Изоляция каждого модуля рассчитана на напряжение 4 кВ. Все модули соединены последовательно, а изоляция последнего модуля на выходе источника должна быть рассчитана на напряжение 40 кВ.

На рис. 1 представлена функциональная схема системы питания на основе сетевого многообмоточного трансформатора $Tr1$ и распределенного емкостного накопителя энергии. Максимальная средняя мощность составляет 300 кВт, максимальная импульсная мощность источника питания — 8 МВт.

Входное напряжение на первичную обмотку трансформатора подается от трехфазной сети 380 В, 50 Гц через тиристорный регулятор. Каждая из десяти вторичных обмоток подключена непосредственно к отдельному модулю. Выпрямители в модулях заряжают накопительные емкости до одинаковых напряжений, определяемых фазовыми углами включения тиристорного регулятора.

Выходы модулей соединены последовательно через диоды. Таким образом, все модули работают независимо друг от друга. Результирующее выходное напряжение регулируется плавно изменением фазового угла и ступенчато — включением нужного числа ячеек. Отрицательная обратная связь по напряжению берется с делителя, подключенного к выходу источника, выходной ток контролируется при помощи датчика тока на эффекте Холла.

Максимальное выходное напряжение модуля 3.6 кВ, максимальное выходное напряжение источника с десятью модулями 36 кВ.

При формировании импульса питающего напряжения модуль № 1 включается на 3 мс раньше всех остальных, чтобы предварительно обеспечить самовозбуждение в.ч.-генераторов для формирования стабильного фронта огибающей ускоряющего в.ч.-напряжения в резонаторе ускорителя. После этого одновременно к выходу подключаются все остальные модули, формируя импульс длительностью 0.5–1 мс.

В ускорителях ИЛУ применяется управляемая триодная электронная пушка, и фронт импульса тока пучка идет с задержкой относительно фронта высоковольтного импульса питания в.ч.-генераторов.

Накопительная емкость каждого модуля за время импульса незначительно разряжается, предусмотрено падение напряжения не более чем на 5%. После окончания импульса все модули отключаются от нагрузки, а накопительные емкости подзаряжаются до заданного напряжения в течение 10–20 мс, и источник питания готов к повторению цикла.

Управление источником питания осуществляется с помощью микропроцессора, что позволяет оптимизировать работу источника, а также обеспечить защиту от различных перегрузок [4].

Для защиты от электромагнитных помех управление транзисторами осуществляется через оптические развязки. На входах всех измерительных аналоговых сигналов устанавливаются дополнительные фильтры [5].

3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНОГО МОДУЛЯ

На рис. 2 представлена принципиальная схема модуля на основе емкостных накопителей. Трехфазный мостовой выпрямитель собран на мощных таблеточных высоковольтных диодах Д123-200-60. Емкостный накопитель модуля состоит из трех соединенных параллельно конденсаторов К75-100-4кВ-1300мкФ $\pm 10\%$, таким образом, его суммарная емкость составляет 3.9 мФ. Запасаемая энергия при этом может достигать 20 кДж.

Коммутирующий ключ собран на IGBT-транзисторе Mitsubishi CM400DY-66Н с рабочим напряжением до 6.5 кВ и средним током до 400 А. Для управления транзистором используется драйвер WEPOWER PHD1032-65. Ток через транзистор контролируется при помощи датчика тока на эффекте Холла U_1 . Управление драйвером осуществляется через оптоволокно. Для развязки питания драйвера по напряжению используется отдельный понижающий трансформатор $Tr1$, подключенный к двум фазам вторичной обмотки высоковольтного силового трансформатора.

Рассмотрим более подробно работу модуля. На вход модуля от вторичной обмотки трансформатора

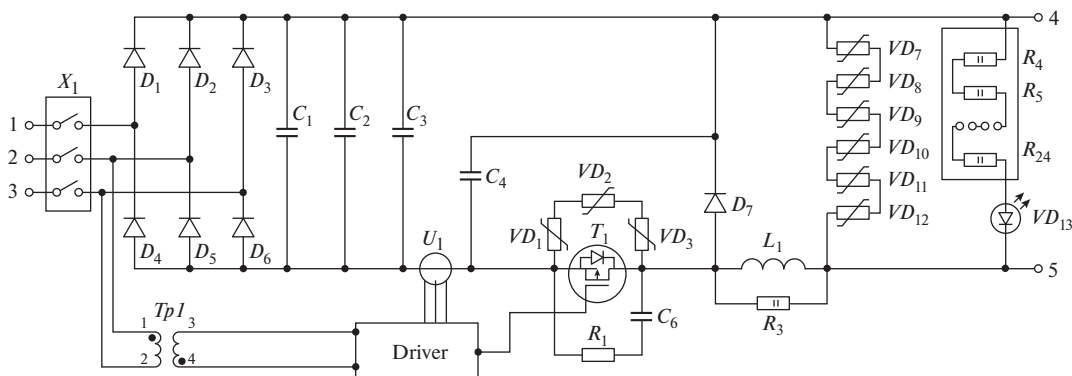


Рис. 2. Упрощенная схема модуля.

тора $Tr1$ поступает трехфазное переменное напряжение от 1 до 3 кВ частотой 50 Гц. Это трехфазное напряжение выпрямляется мостовым диодным выпрямителем D_1-D_6 и заряжает конденсаторы C_1-C_3 до заданного уровня с максимальным значением ≤ 3.6 кВ.

Максимальное напряжение модуля определяется максимальным напряжением питания генераторных триодов ГИ-50А.

По фронту управляющего импульса открывается коммутирующий транзистор T_1 , и конденсаторы C_1-C_3 начинают разряжаться на нагрузку, формируя плато импульса напряжения заданной длительности. Нагрузка подключена через индуктивность L_1 , необходимую для формирования относительно пологого фронта импульса, обеспечивающего комфортную раскочку в в.ч.-системе ускорителя (лампового генератора и резонатора). Кроме того, индуктивность L_1 ограничивает ток нагрузки при пробоях в ускорителе и в в.ч.-системе, обеспечивая время для срабатывания защиты от тока короткого замыкания и выключения транзистора.

На рис. 3 представлен результат моделирования импульсов напряжения длительностью $T_{\text{имп}} = 1$ мс с частотой повторения $F = 100$ Гц (период 10 мс). Верхний график – напряжение на накопительных конденсаторах C_1-C_3 , нижний график – выходное напряжение модуля. Для моделирования выбрана амплитуда импульсов 3.9 кВ и импульсный ток 320 А, нагрузка омическая.

Согласно оценке спада напряжения в конце импульса при работе на омическую нагрузку, падение напряжения за время 1 мс составило $\Delta U = 3.93 - 3.86 = 0.07$ кВ. Это менее 2% и не превышает заданного уровня нестабильности выходного напряжения.

4. ТЕСТИРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНОГО МОДУЛЯ

Для испытания модуля был изготовлен модельный источник питания на основе силового

трансформатора, который не обеспечивал максимальное выходное напряжение, поэтому тестирование проводилось при выходном напряжении до 2 кВ. Плавное регулирование напряжения на накопительной емкости осуществлялось блоком управления тиристорами и симисторами (БУСТ фирмы ОВЕН). В качестве нагрузки использовались мощные резисторы С5-40В-500Вт с результирующим сопротивлением 12 Ом. Питание при тестировании осуществлялось от трехфазной сети 380 В, 50 Гц.

Была проверена работа модуля и отработаны различные режимы работы по напряжению и частоте. Также были отработаны режимы защиты от короткого замыкания и различных пробоев, которые могут происходить на ускорителе во время его работы или тренировки.

В результате тестирования были получены следующие выходные импульсные параметры:

- напряжение на нагрузке 2 кВ;
- ток нагрузки 160 А;
- длительность импульса 0.6 мс;
- частота повторения импульсов 50 Гц;

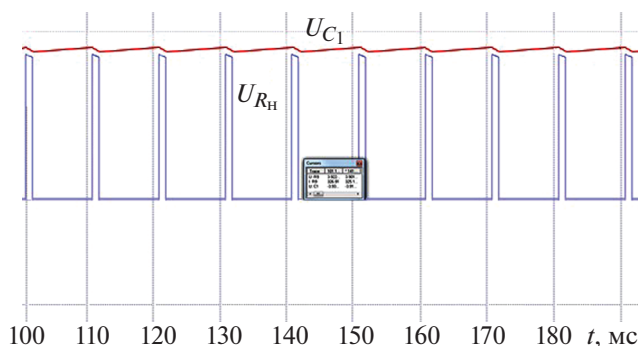


Рис. 3. Результат моделирования. Верхний график – напряжение на накопительных конденсаторах C_1-C_3 , нижний график – выходное напряжение модуля на нагрузочном сопротивлении.

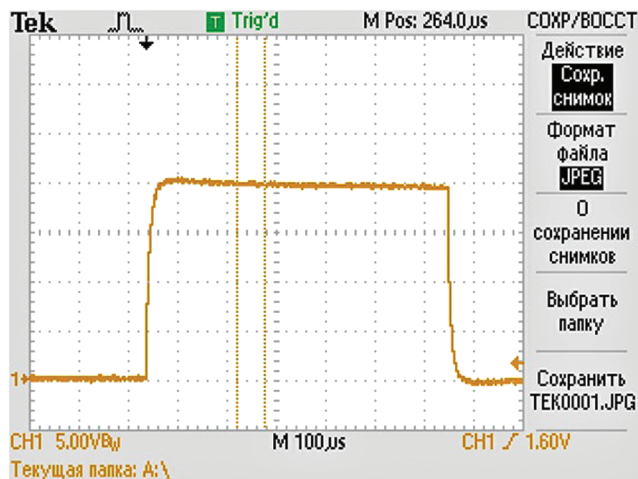


Рис. 4. Осциллограмма импульса выходного напряжения. Масштаб: по вертикали — 5 В/деление, по горизонтали — 100 мкс/деление.

— нестабильность выходного напряжения 2%.

На рис. 4 представлена осциллограмма импульса напряжения на выходе модуля, параметры которого описаны выше. Полученный импульс напряжения полностью соответствует заданным требованиям.

На рис. 5 представлены осциллограммы входных токов каждой фазы. Согласно осциллограмме, нагрузки по току в каждой фазе одинаковы. В результате этого входной трансформатор не будет намагничиваться и нагрузка по всем фазам будет равномерной.

На рис. 6 приведена осциллограмма тока после выпрямителя на входе модуля (1-й канал) и импульса выходного напряжения на нагрузке (2-й канал). Показан каждый полупериод всех трех фаз после выпрямителя на фоне импульса выходного напряжения, находящегося в центре осциллограммы. Согласно осциллограмме, ток зарядки конденсаторов распределен равномерно по всем фазам, что было одним из главных требований к разрабатываемому источнику питания. Результаты испытаний соответствуют результатам моделирования на компьютере.

5. СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ

В конденсаторах постоянно находится большой запас накопленной энергии. Каждый модуль может накапливать до 20 кДж, соответственно суммарная накопленная энергия десяти модулей может достигать 200 кДж. Необходимая энергия одного импульса ускорителя не превышает 4 кДж, что составляет всего около 2% от общей запасаемой энергии. Поэтому в нештатной ситуации, когда выходят из строя управляющие транзисторы или по какой-либо другой причине открываются раз-

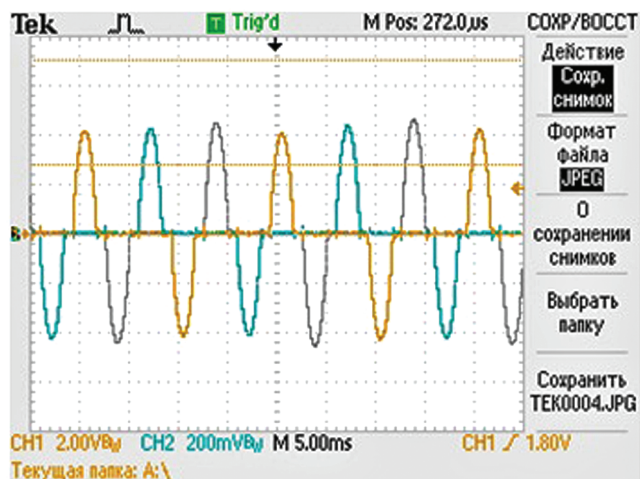


Рис. 5. Осциллограммы входных токов каждой фазы. Масштаб: по вертикали — 2 В/деление, по горизонтали — 5 мс/деление.

рядные ключи, на каждом модуле предусмотрена дополнительная система быстрой разрядки конденсаторов на низкоомный резистор большой мощности через тиристорный ключ. В этом случае вся запасенная энергия рассеивается на защитных резисторах, тем самым предотвращая возможные повреждения элементов и узлов ускорителя от разрядов и пробоев. Также для защиты предусмотрены плавкие предохранители на конденсаторах каждого модуля. При завершении работы для полной безопасности персонала автоматически происходит разрядка конденсаторов через мощные резисторы.

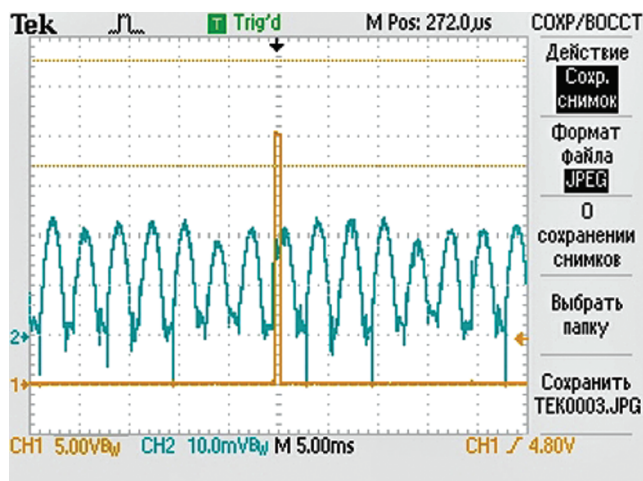


Рис. 6. Осциллограммы тока после выпрямителя (1-й канал) и импульса выходного напряжения (2-й канал). Масштаб: по вертикали для 1-го канала — 5 В/деление, для 2-го канала — 10 мВ/деление; по горизонтали — 5 мс/деление.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания одного модуля источника питания прошли успешно до выходного напряжения 2 кВ и импульсного тока нагрузки 160 А при длительности импульса 0.6 мс и частоте повторения 50 Гц. Собранный модуль работал стабильно и надежно. Планируется заменить трансформатор и испытать модуль на выходное напряжение до 3.6 кВ, а позднее — после отработки одного модуля — будет собран и испытан полный комплект из десяти модулей.

Описанная схема импульсного источника является достаточно простой в использовании и понимании, что важно для систем питания промышленных устройств. Поэтому применение данной схемы может повысить качество работы ускорителей ИЛУ и упростить обслуживание его системы питания.

Предложенная схема позволяет в случае необходимости сравнительно несложно увеличивать

мощность источника питания. В будущем предполагается использовать такие источники для всех ускорителей серии ИЛУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Industrial radiation Processing With Electron beams and X-rays. International Atomic energy Agency technical document. Vienna, 1 May 2011. Revision 6. <http://www.cirms.org/pdf/Industrial%20Radiation%20Processing%20-%20May%202011%20-%20Revision%206.pdf>
2. Брызгин А.А., Куксанов Н.К., Салимов Р.А. // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. № 6. С. 672. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038344>
3. Полищук А. // Современная электроника. 2005. № 3. С. 52.
4. Владимиров Е., Ланцов В., Лебедева О. // Современная электроника. 2008. № 1. С. 42.
5. Ланцов В.В., Эраносян С.А. // Силовая электроника. 2007. № 2. С. 71.