

## НИЗКОЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

© 2013 г. А. В. Лимонов, А. В. Перминов, С. В. Воеводин, В. В. Горохов, А. С. Киржаев,  
А. Б. Буянов, В. И. Карелин, Ю. Н. Лашманов, М. М. Мустайкин

*РФЯЦ “ВНИИ экспериментальной физики”*

*Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., ул. Мира, 37*

*E-mail: limonov\_av@mail.ru*

Поступила в редакцию 23.05.2012 г.

Описаны схема и конструкция генератора биполярных импульсов напряжения произвольной формы амплитудой до 800 В с мощностью в согласованной нагрузке 400 кВт. Генератор выполнен на основе автомобильных аккумуляторных батарей и силовых IGBT-транзисторов. Приведены результаты экспериментов по формированию мощных гармонических сигналов с частотами 50 Гц и 1 кГц.

DOI: 10.7868/S0032816213020213

### ВВЕДЕНИЕ

К основным задачам, решаемым с помощью мощных низкочастотных (н.ч.) генераторов, относят крупномасштабное изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии, снятие тектонических напряжений в сейсмоопасных зонах, поиск полезных ископаемых на больших глубинах в континентальной части, нефте- и газоразведка на шельфе океанов и ряд других. Для этих целей применялись портативные магнитогидродинамические (м.г.д.) установки кратковременного действия, генерирующие сигналы мощностью ~10 МВт [1]. Однако из-за высокой себестоимости, малого ресурса м.г.д.-канала и ограниченной возможности управления параметрами выходных импульсов широкого распространения они не получили.

В настоящее время для исследования земной коры используются генераторы и источники инверторного типа, например генератор низких частот (0.1–300 Гц) с установленной мощностью 400 кВт · А [2]. Питание генератора осуществляется от электросети, что привязывает его к мощным энергосистемам, тем самым ограничивая области его применения.

В данной работе описан автономный портативный генератор мощных н.ч.-сигналов произвольной формы с широким диапазоном регулирования формы и частоты выходных импульсов ( $10^{-2}$ – $10^3$  Гц) и высокой точностью воспроизведения параметров заданного сигнала [3]. Генератор выполнен на основе автомобильных стартерных аккумуляторных батарей и IPM IGBT-модулей, характеризуется сравнимыми с м.г.д.-установками удельными энергетическими показателями

(~500 кВт на тонну конструкции) и обладает на несколько порядков большим рабочим ресурсом.

### ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ГЕНЕРАТОРА

Генератор собран по схеме ступенчатой коммутации элементарных источников напряжения на нагрузку [4]. Источники питания, выполненные по этой схеме, состоят из  $n$  идентичных каскадов. Каждый каскад содержит коммутатор, диод и источник постоянного напряжения, который в большинстве случаев представляет собой трансформатор и выпрямитель.

На рис. 1 приведена принципиальная схема генератора, основанная на управляемой ступенчатой коммутации источников напряжения  $U_1$ – $U_6$ . Каждый источник состоит из последовательно соединенных аккумуляторных батарей Optima Red Top (12.5 В, 50 А · ч). В заряженном состоянии одна аккумуляторная батарея имеет внутреннее сопротивление  $\approx 5$  мОм и способна выдавать стартовый ток более 800 А.

Выходное напряжение источников  $U_n$  определяется числом аккумуляторов и составляет  $U_n = 12.5 \cdot 2^{n-1}$ , где  $n$  – номер каскада. Такая комбинация источников напряжений позволяет формировать сигналы на выходе генератора по принципу двоичной логики с шагом изменения напряжения 12.5 В. Выходное напряжение генератора определяется числом включенных каскадов.

Диоды  $D_1$ – $D_6$  выключенных каскадов замыкают токовый контур нагрузки  $Z$ . Сглаживание пульсаций выходного тока и напряжения осуществляется цепью  $L_1C_1$ . Защитный диод  $D_7$  фикс-

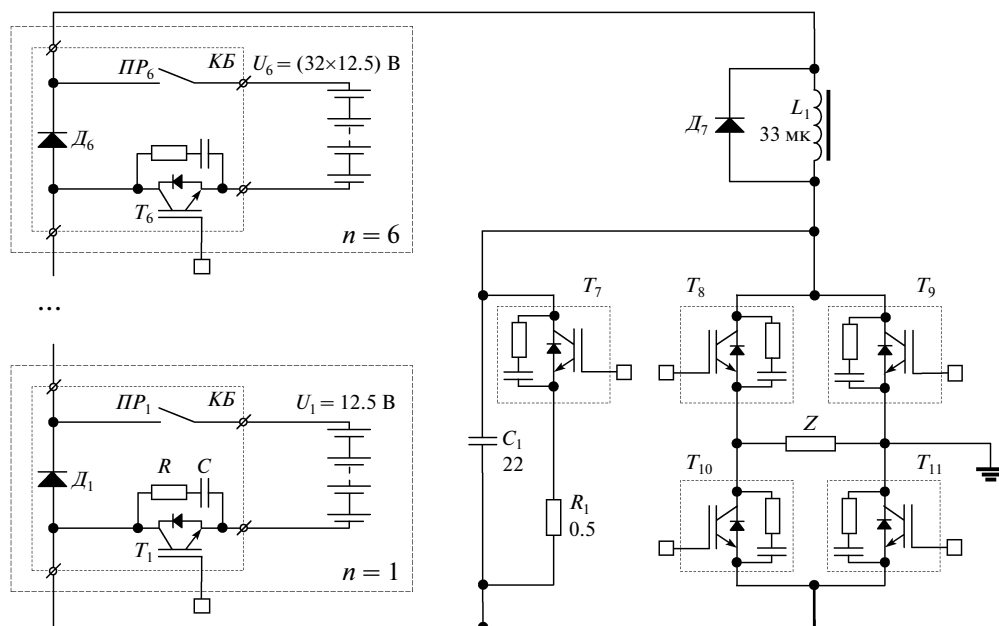


Рис. 1. Принципиальная схема генератора. КБ – коммутационные блоки. Транзисторы (PM800HSA120) и диоды (RM400HA-34S) – Mitsubishi.

сирует напряжение на соленоиде  $L_1$  при выключении коммутаторов  $T_8$ – $T_{11}$ .

В качестве коммутаторов  $T_1$ – $T_{11}$  используются IPM IGBT-модули PM800HSA120. Подключение  $U_1$ – $U_6$  к нагрузке осуществляется посредством  $T_1$ – $T_6$  соответственно. Попарное отпирание коммутаторов  $T_8$ ,  $T_{11}$  или  $T_9$ ,  $T_{10}$  определяет направление тока в нагрузке. Коммутатор  $T_7$  осуществляет быструю разрядку конденсатора  $C_1$  (К 78-12, 1000 В) на резистор  $R_1$  при переполюсовке выходного напряжения.

Защита коммутаторов от перенапряжения, возникающего на клеммах при выключениях, обеспечивается унифицированными последовательными низкоиндуктивными RC-цепями (снабберами) [5]. Конденсаторы  $C$  имеют емкость 4 мкФ и состоят из 4-х параллельно соединенных фольговых конденсаторов (EPCOS B32656-S7105-K500). Резисторы  $R$  имеют сопротивление  $\approx 1$  Ом и состоят из 30 параллельно соединенных резисторов ТВО-2.

Для размыкания токовых контуров каскадов генератора при хранении и обслуживании, а также в случае возникновения аварийной ситуации используются механические размыкатели  $ПП_1$ – $ПП_6$  с пневматическим приводом на основе пневмоцилиндров (SMC C85N16-40).

Управление коммутаторами  $T_1$ – $T_{11}$  осуществляется автономным микропроцессорным блоком управления по коаксиальным кабельным линиям. Схемы интерфейса IGBT-модулей обеспечи-

вают оптическую развязку кабельных линий и коммутаторов.

Блок управления оцифровывает аналоговый сигнал, поступающий с задающего генератора, и после программной обработки формирует параллельный цифровой код для коммутаторов. В результате генератор формирует импульс напряжения, усиленный в 320 раз относительно сигнала задающего генератора. Амплитуда выходного напряжения регулируется линейно амплитудой сигнала задающего генератора. В качестве задающего генератора используется генератор импульсов произвольной формы Tabor WW5062.

## КОНСТРУКЦИЯ ГЕНЕРАТОРА

Принципиальная конструктивная схема генератора приведена на рис. 2. На дюралюминиевом каркасе 1 генератора в четыре этажа закреплены аккумуляторные батареи 2 в нормальном положении. Каждый этаж состоит из двух линеек батарей по восемь в каждой. Аккумуляторная батарея 3 не задействована в схеме генератора и является резервной.

Выбор аккумуляторной батареи Optima Red Тор обусловлен тем, что наряду с большим стартовым током аккумуляторы полностью герметичны, выдерживают сильные вибрации и сохраняют рабочие характеристики в температурном диапазоне  $-40\dots+40^\circ\text{C}$ .

Подзарядка каждой аккумуляторной батареи осуществляется независимо от других батарей с помощью зарядных устройств “Сонар УЗ 205.05”

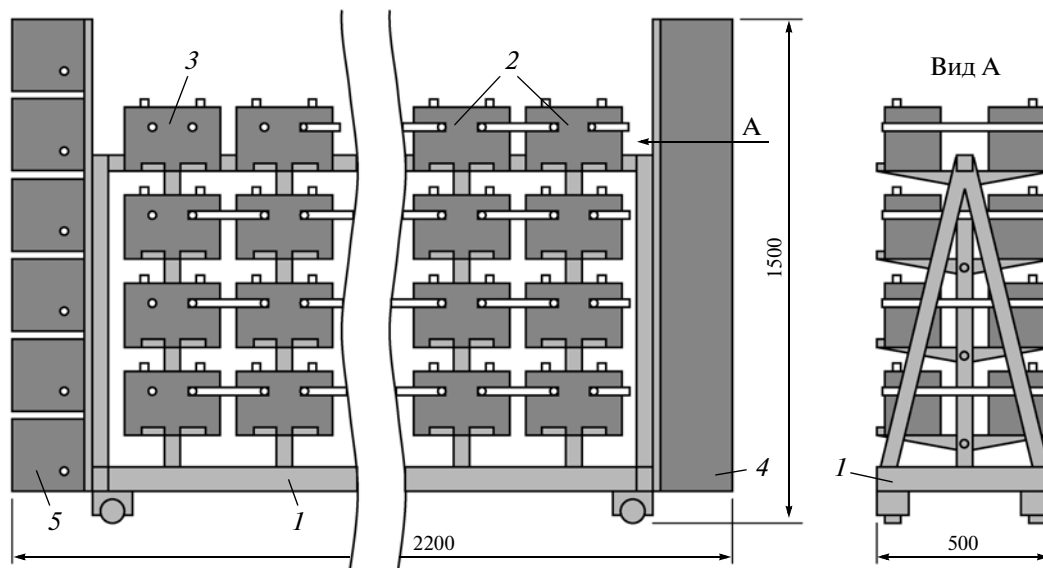


Рис. 2. Принципиальная конструктивная схема генератора. 1 – каркас; 2 – аккумуляторные батареи; 3 – резервная аккумуляторная батарея; 4 – шкаф с зарядными устройствами; 5 – стойка с коммутационными блоками.

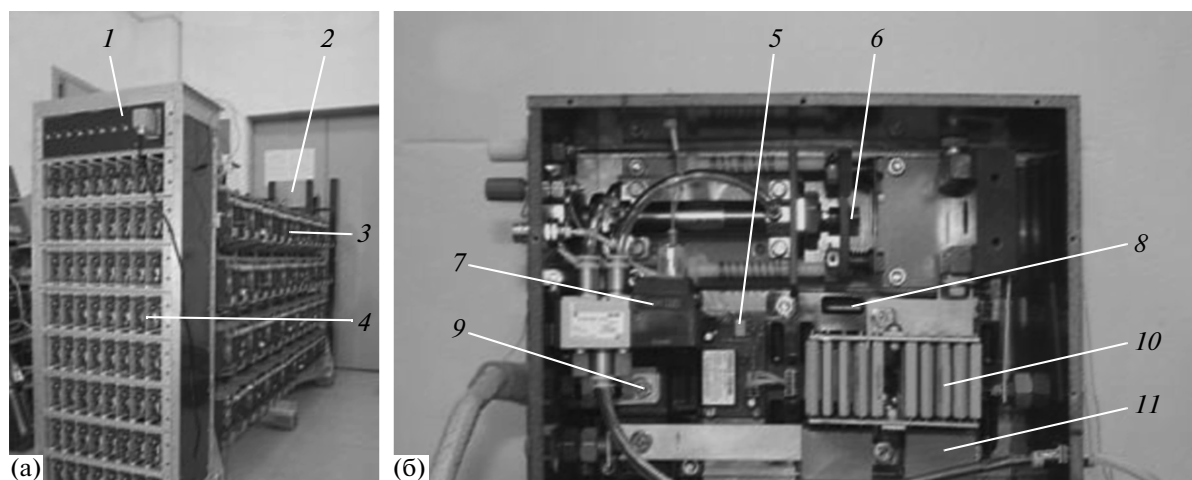


Рис. 3. Внешний вид генератора (а) и коммутационного блока (б). 1 – шкаф с зарядными устройствами; 2 – стойка с коммутационными блоками; 3 – аккумуляторные батареи; 4 – зарядные устройства; 5 – схема интерфейса IGBT-модуля  $T$ ; 6 – пневморазмыкатель  $ПР$ ; 7 – пневмораспределительное устройство фирмы SMC; 8 – IGBT-модуль  $T$ ; 9 – силовой диод  $D$ ; 10 – снабберный резистор  $R$ ; 11 – снабберный конденсатор  $C$ .

и сетевых выпрямителей на основе трансформаторов ТП-9253/1 с повышенной прочностью межобмоточной и межвыводной изоляции. Зарядные устройства и выпрямители собраны в шкаф 4, закрепленный на торце каркаса генератора.

Коммутационные блоки  $КБ$  (рис. 1) идентичны друг другу и размещены на стойке 5 (рис. 2), закрепленной на другом торце каркаса генератора. Каждый  $КБ$  собран в отдельном корпусе, содержит механический размыкатель, силовой диод, IGBT-модуль, снаббер и имеет 4 силовых

вывода. IGBT-модуль и диод закреплены на задней стенке корпуса. Задняя стенка выполнена из дюралюминия, чем обеспечивается отвод тепла от полупроводниковых элементов. Для визуального контроля элементов  $КБ$  лицевая сторона корпуса выполнена из прозрачного оргстекла, боковые, верхние и нижние стенки – из текстолита.

Масса генератора  $\approx 1300$  кг, габаритные размеры  $2.2 \times 1.5 \times 0.5$  м. Внешний вид генератора и коммутационного блока показан на рис. 3.

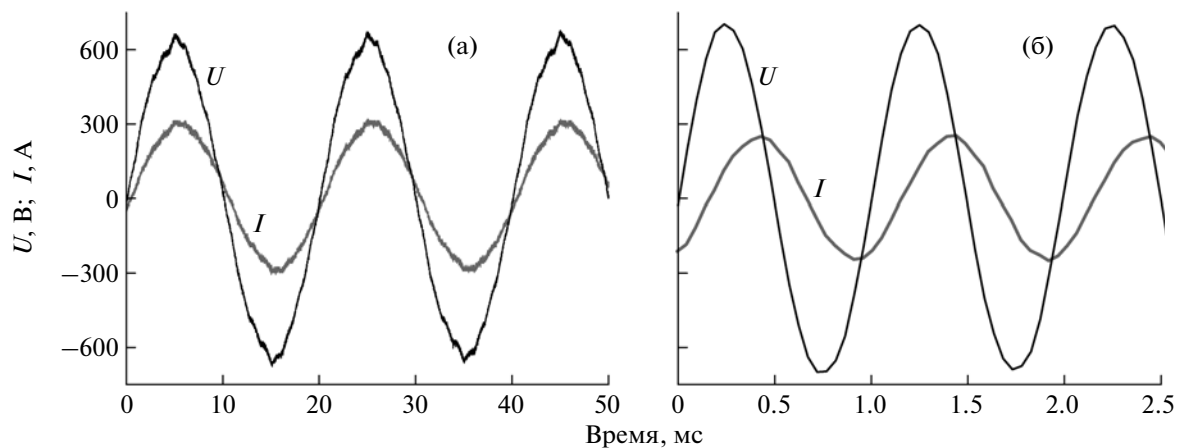


Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжения и тока с частотой 50 Гц (а) и 1 кГц (б).

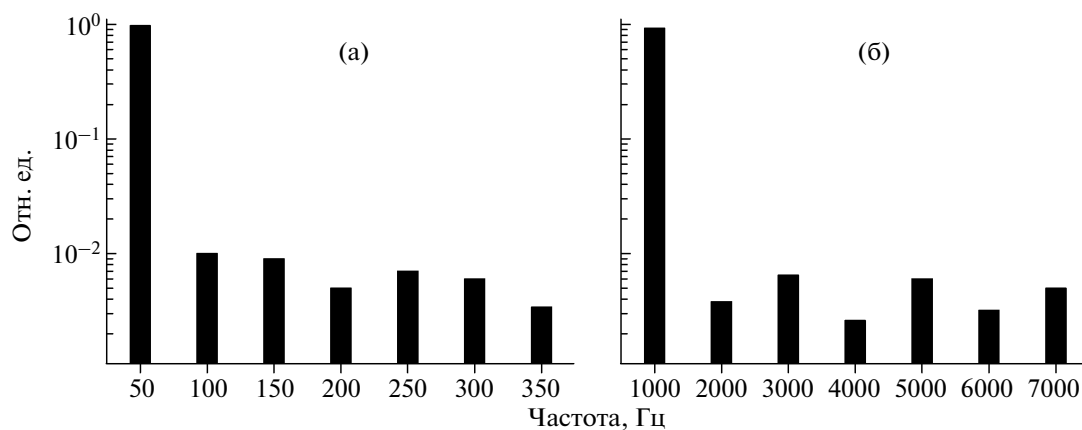


Рис. 5. Фурье-спектр выходных сигналов с частотой 50 Гц (а) и 1 кГц (б).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Опытный образец генератора многократно применялся в полевых геофизических исследованиях. Эксперименты показали, что генератор формирует в мощных нагрузках различных типах пакеты импульсов напряжения заданной формы с частотой до 1 кГц. Максимальная длительность пакетов 50 с.

Примеры сигналов мощностью  $\approx 100$  кВ · А, сформированных в комплексных нагрузках с индуктивностями 10 и 0.6 мГн и соответственно активными сопротивлениями 2.3 и 5.3 Ом, представлены на рис. 4.

Фурье-спектр выходных импульсов напряжения представлен на рис. 5.

Видно, что уровни высших гармоник не превышают 1% от амплитуд соответствующих импульсов напряжения на нагрузках.

Максимальная выходная мощность генератора  $P_{\max} = 400$  кВт вычислена по формуле  $P_{\max} = U_{\max}^2 / 4r_{\text{ген}}$ , где  $U_{\max} = 800$  В – максимальное напряжение холостого хода генератора,  $r_{\text{ген}} = 0.4$  Ом – внутреннее сопротивление генератора. Для экспериментального определения  $P_{\max}$  необходима мощная активная нагрузка, согласованная с  $r_{\text{ген}}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан н.ч.-генератор импульсов напряжения произвольной формы с максимальной расчетной мощностью 400 кВт. Масса, габариты и энергозапас позволили использовать его в качестве транспортабельного источника питания для различных мощных нагрузок. Генератор также использовался в составе лабораторного электротехнического стенда для питания соленоида с энергозапасом  $\sim 100$  кДж стабилизированными импульсами тока амплитудой  $\sim 100$  А.

Схема ступенчатой коммутации источников напряжения позволяет увеличивать максимальное выходное напряжение генератора наращиванием каскадов.

Для получения сигналов мощностью  $>400$  кВт на низкоомной нагрузке возможен режим параллельной работы нескольких генераторов. При этом подбором количества генераторов можно добиться согласования внутреннего сопротивления полученного источника с нагрузкой.

Опыт эксплуатации экспериментального образца включает более 1000 успешных пусков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2000. Т. 4. С. 169–170.
2. Гуревич М.К., Иванова Л.А., Козлова М.А. и др. // ПТЭ. 2010. № 3. С. 61.
3. Лимонов А.В., Буянов А.Б., Воеводин С.В. и др. Патент 2421872 РФ; [www.FindPatent.RU](http://www.FindPatent.RU)
4. Frey, Barry R. US patent 5710520; [www.bks2.books.google.ci/patents/US7620129.pdf](http://www.bks2.books.google.ci/patents/US7620129.pdf)
5. Семёнов Б.Ю. Силовая электроника. М.: Солон-Р, 2001. С. 227.