

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО СХЕМЕ АРКАДЬЕВА – МАРКСА В РЕЖИМЕ ПОКАСКАДНОГО ОБОСТРЕНИЯ ФРОНТА ИМПУЛЬСОВ И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ

Н.И. Бойко\*, докт.техн.наук

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина,

e-mail: [boyko@kpi.kharkov.ua](mailto:boyko@kpi.kharkov.ua) ; [qnaboy@mail.ru](mailto:qnaboy@mail.ru)

*Исследован зарядно-разрядный процесс срабатывания генератора импульсных напряжений по схеме Аркадьева-Маркса в режиме с покаскадным обострением фронта импульсов как экспериментально, так и при помощи моделирования в Micro-Cap10. Учтены индуктивность разрядников и наличие отрезков длинных линий в цепи генератора. Результаты моделирования процесса формирования импульсов напряжения в этом режиме подтвердили возможность укорочения длительности фронта импульсов на нагрузке генератора до субнаносекундных значений. Результаты моделирования и осциллограммы импульсов напряжения на нагрузке генератора показали, что предложенная схема хорошо моделирует процесс его разряда. Библ. 4, рис. 4.*

**Ключевые слова:** генератор, искровой разрядник, покаскадное обострение фронта импульсов, емкость каскада, нагрузка, новые технологии.

Принцип работы и первые экспериментальные результаты исследования работы высоковольтных генераторов импульсных напряжений (ГИН) по схеме Аркадьева – Маркса в режиме покаскадного обострения фронта импульсов (ГИНПО) описаны в [1]. Целью данной работы является моделирование режима покаскадного обострения фронта импульсов в Micro-Cap10 и сравнение результатов моделирования с экспериментальными результатами, полученными на усовершенствованном генераторе ГИНПО.

Электрическая принципиальная схема ГИНПО, при помощи которой осуществлялось моделирование, показана на рис. 1. Особенностью схемы является то, что емкости каскадов не заменяются источниками напряжения, как в [2]. Это позволяет существенно точнее смоделировать работу ГИНПО, приблизив результаты моделирования к экспериментальным. Еще одной особенностью является использование в качестве коммутаторов искровых разрядников (Spark gaps), а не идеальных ключей. Условием для начала срабатывания разрядников было достижение напряжением на каждом разряднике пробивного значения. В соответствии с режимом покаскадного обострения фронта формируемых импульсов пробивное напряжение возрастало с ростом номера кас-

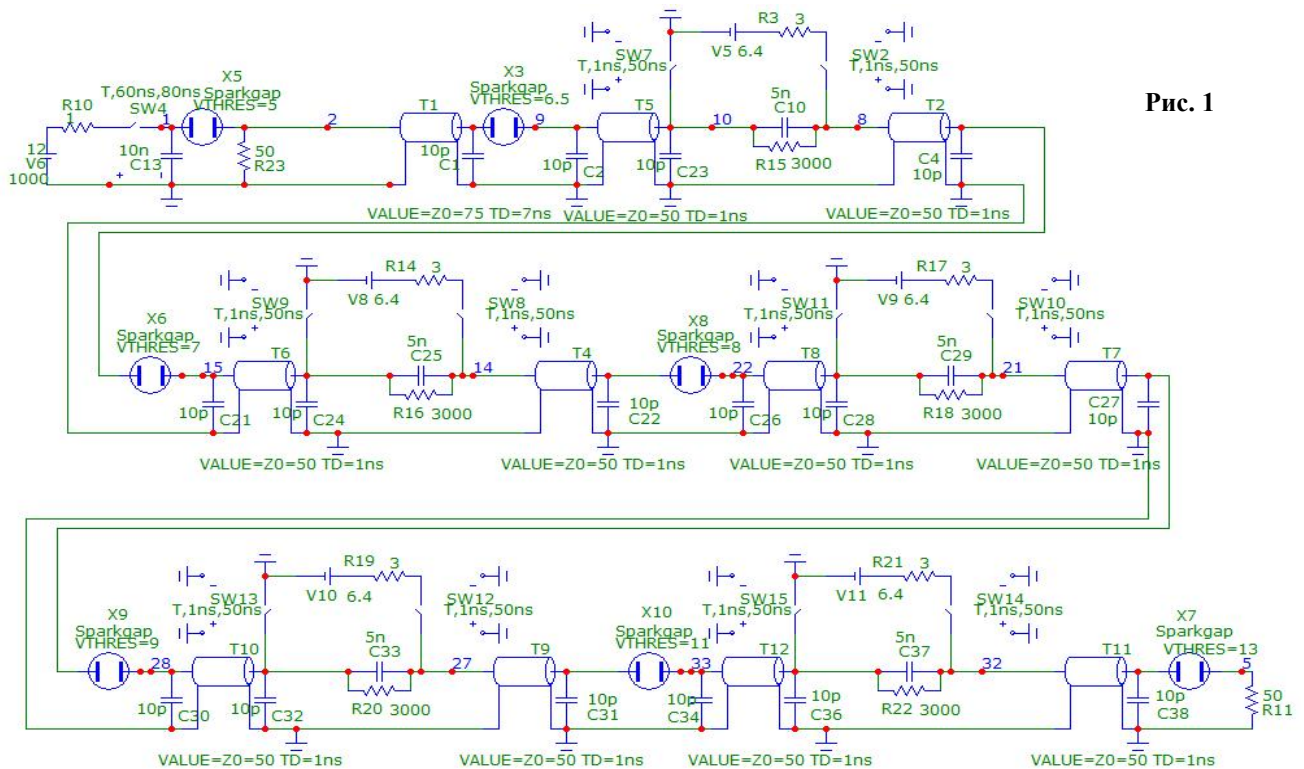


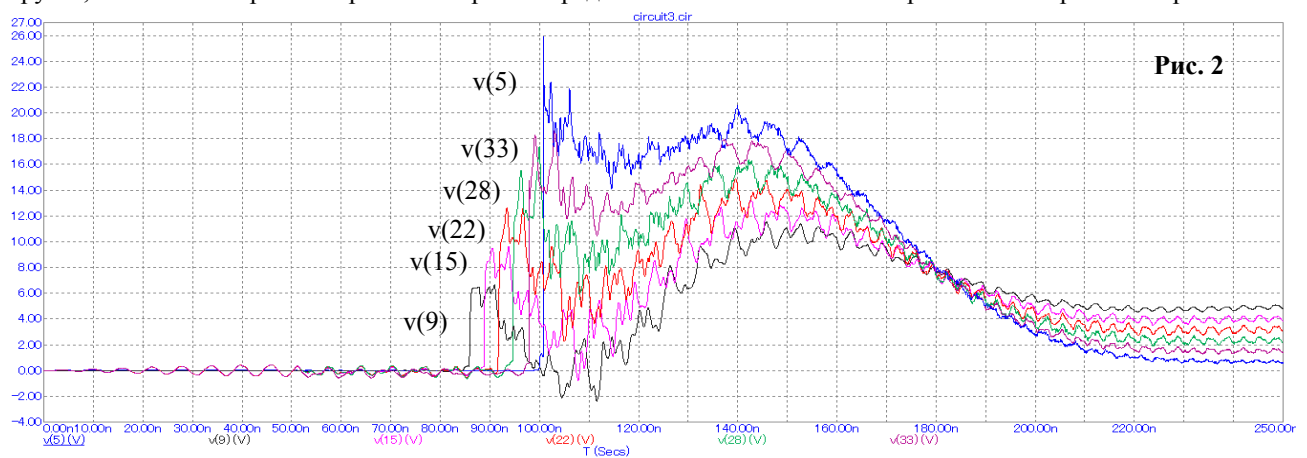
Рис. 1

© Бойко Н.И., 2016

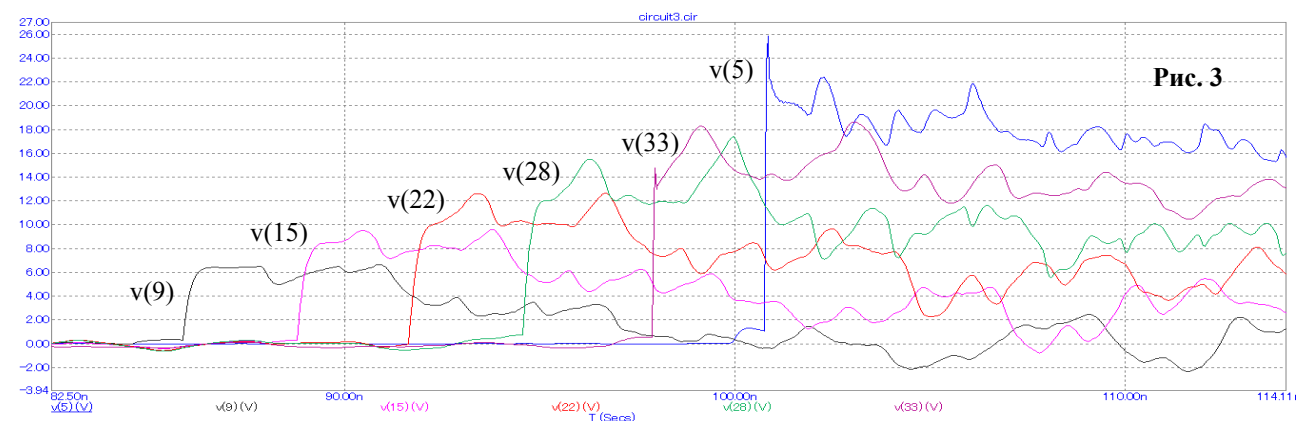
\*ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1362-2867/>

када, начиная с первого, наиболее удаленного от нагрузки. Отличием схемы на рис. 1 является наличие отрезков идеальных коаксиальных длинных линий между емкостными накопителями и разрядниками каскадов. Отрезки длинных линий позволяют выполнить развязку между соседними последовательно срабатывающими разрядниками, т.е. длина двойного пробега по каждому из отрезков линий больше, чем полное время срабатывания разрядника каскада. Вследствие этого фронт формирующегося в энергопроводе ГИНПО импульса напряжения, отраженный от ближайшего еще не сработавшего разрядника, попадает на предыдущий разрядник, когда он уже полностью сработал (его коммутация завершена), поэтому отраженная волна проходит через него без искажений. Трудностью при отладке схемы ГИНПО в Micro-Cap10 явилось то, что после окончания заряда и отключения источников напряжения от заряженных емкостей каскадов ГИНПО, но до срабатывания искровых разрядников, выводы емкостей каскадов по постоянному напряжению (току) не соединены с землей, поэтому потенциалы этих выводов точно не определены. При этом разность потенциалов между выводами определена и равна напряжению источника питания каждого каскада. Эту трудность удалось преодолеть, включив параллельно каждой емкости каскадов определенное активное сопротивление. При моделировании реальное соотношение между временем заряда емкостных накопителей ГИНПО и временем их разряда (время заряда обычно гораздо больше времени разряда) не учитывалось [3, 4].

Результаты моделирования работы ГИНПО, отображающие процесс формирования импульса на его нагрузке, показаны на рис. 2 и рис. 3. На рис. 2 представлены зависимости напряжения от времени в различных

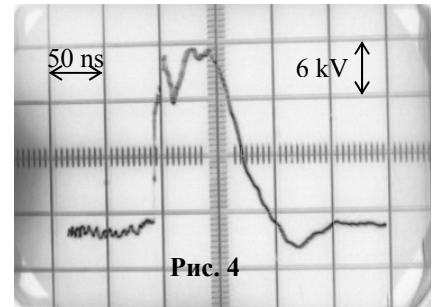


точках схемы на рис. 1 (импульсы напряжения целиком v(5), v(9), v(15), v(22), v(28), v(33)). Импульс v(5) в точке 5 – это импульс напряжения на резистивной нагрузке генератора величиной 50 Ом. На рис. 3 представле-



ны фронтные части импульсов напряжения в тех же точках схемы. Переходный процесс в схеме моделировался как с учетом, так и без учета индуктивностей выводов разрядников. Можно считать, что в индуктивности разрядников включены все паразитные индуктивности разрядной цепи ГИНПО. При учете индуктивностей фронт формирующегося импульса менее крутой, а задержка в формировании фронта между каскадами больше, чем в случае без учета индуктивностей. Но решающую роль для результирующего значения длительности фронта на нагрузке генератора играет пробивное напряжение и индуктивность выходного разрядника ГИНПО. В обоих вариантах индуктивность выходного разрядника принималась равной нулю. На форму импульсов на нагрузке с сопротивлением, близким или равным волновому сопротивлению энергопровода ГИНПО, учет индуктивности каждого разрядника (до 10 нГн) влияет слабо. Моделирование подтвердило экспериментальный результат о том, что длительность фронта импульсов на нагрузке ГИНПО в основном определяется временем коммутации выходного разрядника и в нижнем пределе равна ему, достигая субнаносекундных значений. Мо-

делирование показало, что важна величина выбранного максимального шага по времени. Приведенные результаты получены при максимальном шаге 0,05 нс. Осциллограмма на резистивной нагрузке (примерно 50 Ом) пятикаскадного ГИНПО приведена на рис. 4. Осциллограмма получена при помощи резистивного делителя напряжения и широкополосного аналогового осциллографа С7-19 с полосой пропускания 5 ГГц. Амплитуда напряжения на нагрузке ГИНПО составляет примерно 18 кВ. Сравнение результатов моделирования и экспериментально полученных осциллограмм на резистивной нагрузке ГИНПО показывает, что предложенная схема хорошо моделирует процесс его разряда. ГИНПО может найти применение не только в традиционных областях физики и техники, в том числе в радиолокационной технике, но и в новых технологиях, например, для обеззараживающей обработки тепучих пищевых продуктов (в англоязычных источниках:– Pulsed Electric Field (PEF) Treatment – обработка импульсным электрическим полем). Одним из конкурентных преимуществ ГИНПО является возможность его синхронной работы по нескольким параллельным разрядным каналам на несколько нагрузок.



1. Бойко Н.И. Генератор по схеме Аркадьева – Маркса в режиме с покаскадным обострением фронта импульсов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2000. – Частина 6. – С. 94 – 97.
2. Кремнев В.В., Месяц Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов в силовоточной электронике. – Новосибирск: Наука, 1987. – 226 с.
3. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
4. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М.: Сов. Радио, 1974. – 256 с.

УДК 621.373

#### МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ГЕНЕРАТОРА ІМПУЛЬСНИХ НАПРУГ ЗА СХЕМОЮ АРКАДЬЄВА – МАРКСА В РЕЖИМІ ПОКАСКАДНОГО ЗАГОСТРЕННЯ ФРОНТУ ІМПУЛЬСІВ І ПОРІВНЯННЯ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ

М.І. Бойко, докт.техн.наук

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна,

e-mail: [boyko@kpi.kharkov.ua](mailto:boyko@kpi.kharkov.ua) ; [gnabov@mail.ru](mailto:gnabov@mail.ru)

*Досліджено зарядно-розрядний процес спрацьовування генератора імпульсних напруг за схемою Аркадьєва-Маркса в режимі з покаскадним загостренням фронту імпульсів як експериментально, так і за допомогою моделювання в Micro-Cap10. Враховано індуктивність розрядників і наявність відрізків довгих ліній у колі генератора. Результати моделювання процесу формування імпульсів напруги в цьому режимі підтвердили можливість укорочення тривалості фронту імпульсів на навантаженні генератора до субнаносекундних значень. Результати моделювання і осцилограми імпульсів напруги на навантаженні генератора показали, що запропонована схема добре моделює процес його розряду. Бібл. 4, рис. 4.*

**Ключові слова:** генератор, іскровий розрядник, покаскадне загострення фронту імпульсів, ємність каскаду, навантаження, новітні технології.

#### SIMULATING OF THE OPERATION OF VOLTAGE PULSE GENERATOR ON THE ARKADIEV – MARX SCHEME IN MODE WITH PEAKING OF THE PULSE FRONT IN ITS CASCADES AND COMPARISON WITH THE EXPERIMENTAL RESULTS

М.І. Boyko

National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”,

Frunze str., 21, Kharkov, 61002, Ukraine,

e-mail: [boyko@kpi.kharkov.ua](mailto:boyko@kpi.kharkov.ua) ; [gnabov@mail.ru](mailto:gnabov@mail.ru)

*It investigated charge-discharge process of operation of voltage pulse generator on Arkadiev – Marx scheme in mode with peaking of the pulse front in its cascades, both experimentally and by means of simulation in Micro-Cap10. Inductance dischargers and the presence of segments of long lines in the generator circuit are taken into account. The results of the simulation of the process of the formation of the voltage pulses in this mode confirmed the possibility of shortening the pulse rise time on the generator’s load to subnanosecond values. The simulation results and oscillograms of voltage pulses on the generator’s load have shown that the proposed scheme simulates the process of its discharge well. References 4, figures 4.*

**Key words:** generator, spark gap, peaking of pulse front in cascades, capacitance of cascade, load, novel technologies.

1. Boyko M.I. Generator on Arkadiev – Marx scheme in the mode with peaking of pulse front in its cascades // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematichnyi vyputsk “Problemy suchasnoi elektrotekhniki”. – 2000. – Part 6. – Pp. 94 – 97. (Rus)
2. Kremnev V.V., Mesyats G.A. Methods of multiplication and transformation of pulses in the high-current electronics. – Novosibirsk: Nauka, 1987. – 226 p. (Rus)
3. Mesyats G.A. Pulsed power and electronics. – Moskva: Nauka, 2004. – 704 p. (Rus)
4. Mesyats G.A. Generation of power nanosecond pulses. – Moskva: Sovetskoe Radio, 1974. – 256 p. (Rus)

Надійшла 03.02.2016  
Остаточний варіант 29.04.2016