

К. м. н. В. Е. БАБЕЛЮК¹, д. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ^{2,3},
к. м. н. И. Л. ПОПОВИЧ⁴, И. Г. КОРСУНСКИЙ²

Украина, г. Трускавец, ¹Санаторий «Молдова»; г. Черновцы, ²СКБ «ПДК», ³ЧНУ имени Юрия Федьковича; г. Киев, ⁴Институт физиологии НАН Украины им. О. О. Богомольца
E-mail: yuriydr@gmail.com

ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕРАПИИ И СТИМУЛЯЦИИ НЕРВНЫХ ЦЕНТРОВ ЧЕЛОВЕКА

Разработан генератор, названный VEB-1, для электротерапии и стимуляции нервных центров человека токовыми импульсами с точностью поддержания частоты стимуляции не более 0,001 Гц. Принцип действия генератора основан на методе частотного биения. Несущая частота рабочих токовых импульсов соответствует 32-й гармонике частоты биения рабочих импульсов. Проведены клинические испытания, показавшие эффективность генератора по двадцати характеристическим показателям состояния здоровья.

Ключевые слова: генератор, электростимуляция, нервный центр, импульс тока, частотное биение.

Развитие медицинской науки и свежие идеи в клинической медицине ставят новые задачи по созданию аппаратуры для практического здравоохранения. Современный технологический фундамент научной и клинической медицины возник и развивается на стыке наук, основывается на потенциале различных областей науки и техники и объединяется общими проблемами медицинской направленности.

Инвестиции, вкладываемые в развитие современной электронной техники биомедицинского назначения, составляют миллиарды долларов и продолжают увеличиваться. В ноябре 2016 года аналитическая компания Kalorama Information [1] обнародовала краткие результаты исследования мирового рынка в отношении только медицинской носимой электроники. Его объем в 2016 году превысил \$13 млрд. и продолжает расти.

Одним из востребованных в настоящее время направлений является разработка биомедицинской аппаратуры для электростимуляции нервной системы. Основной задачей электростимуляции является усиление, возбуждение или восстановление ослабленной или болезненно измененной деятельности определенных органов и систем [2–4]. Электростимуляция нервной системы проводится путем воздействия на организм незначительных импульсов электрического тока, имитирующих ее нормальные электрические сигналы.

Современные аппараты для электростимуляции могут генерировать импульсы прямоугольной, треугольной, трапециевидной формы различной длительности и частоты. Однако для эффективной стимуляции ослабленного органа не-

обходимо также обеспечить максимальное совпадение частоты, генерируемой электронным стимулятором, с собственной рабочей частотой колебания органа. Среди представленных на рынке электростимуляторов мышц, нервов и отдельных органов имеется достаточно много приборов, которые способны поддерживать точность установки частоты на уровне 0,1–0,01 Гц [5–11]. При этом, однако, у разных людей рабочие частоты одних и тех же органов могут отличаться. Согласно нашим исследованиям эти отличия укладываются в определенный частотный диапазон, отклонения между двумя людьми может составлять от 0,1 до 0,001 Гц [11, 12].

В настоящей работе был создан генератор электрических сигналов для стимуляции органов человека с точностью поддержания частоты не ниже 0,001 Гц.

Методика решения задачи

В качестве объекта воздействия электрическими сигналами были выбраны нервные центры (узлы) организма человека.

Нервные центры имеют ряд характерных функциональных свойств, из которых наибольший интерес в рамках нашей задачи представляет трансформация ритма возбуждений, т. е. изменение частоты нервных импульсов при прохождении через нервный центр. В силу особенностей центральной нервной системы частота возбуждений, поступающих из нервных центров к рабочему органу, колеблется от 50 до 200 в секунду.

В результате экспериментальных исследований воздействия импульсов прямоугольной формы частотой 7–18 Гц были зафиксированы ди-

диапазоны частот для каждого основного нервного узла. Нижняя частота каждого из диапазонов оказывала минимальное стимулирующее воздействие на соответствующий нервный узел, верхняя — максимальное.

Для эффективного возбуждения нервных центров, а именно — повышения собственной рабочей частоты, необходимо выбрать метод их стимуляции. Оптимальным здесь, на наш взгляд, является волновое воздействие на нервные центры, реализуемое методом частотных биений. Этот метод заключается в получении колебаний с близкими частотами f_{01} и f_{02} [13; 14, с. 173—190], благодаря чему эффект воздействия на объект усиливается. При упрощенном рассмотрении амплитуды обоих колебаний A_{m1} и A_{m2} будем считать равными между собой ($A_{m1} = A_{m2} = A_m$), как и их частоты. В результате сложения колебаний с близкими частотами возникают результирующие биения, которые представляют собой колебания с усредненной частотой $(f_1 + f_2)/2$. Амплитуда биений периодически изменяется от максимального значения $2A_m$ до минимального значения 0. При каждом обращении амплитуды в ноль фаза скачком меняется на π . Частота биений определяется как разность частот составляющих колебаний.

В нашем случае для получения эффекта — частотного биения — в двух сигнальных каналах формируются импульсы прямоугольной формы с разницей по частоте, являющей частотой биения.

Причиной появления биений является сдвиг фаз сигналов с формированием следующего импульса, причем сдвиг фазы кратен разности частот в каналах:

$$P = 360^\circ / (f_1 - f_2), \quad (1)$$

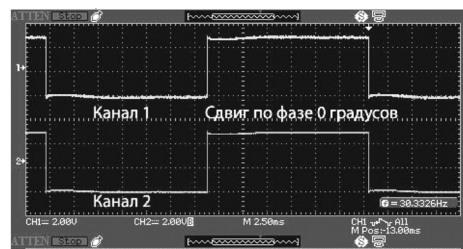
где P — сдвиг фазы (в градусах);

f_1, f_2 — частота первого и второго каналов соответственно.

К примеру, для получения биения с частотой 6 Гц необходимо в первом канале сформировать импульсы с несущей частотой 30 Гц, во втором — 36 Гц.

При формировании первого импульса в обоих каналах со сдвигом фаз 0° получим на выходе абсолютный ноль по току (рис. 1, а). При формировании второго импульса разность частот 6 Гц приводит к сдвигу по фазе 60° ($360^\circ/6$), а скважность импульса на выходе составляет $100\%/6 = 16,67\%$. Отметим, что в данном случае с каждым последующим тактом происходит увеличение сдвига по фазе на 60° (рис. 1, б—е). При формировании третьего импульса скважность составляет 33,33%; при формировании четвертого — 50%; пятого — 33,33%; шестого — 16,67%.

а)



б)



в)



г)



д)



е)

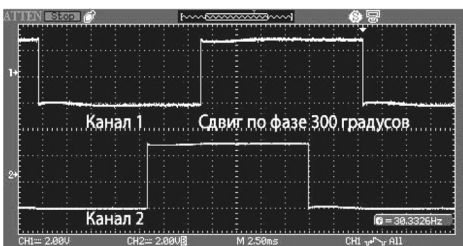


Рис. 1. Формирование импульсов, начиная со первого (а) и до шестого (е)

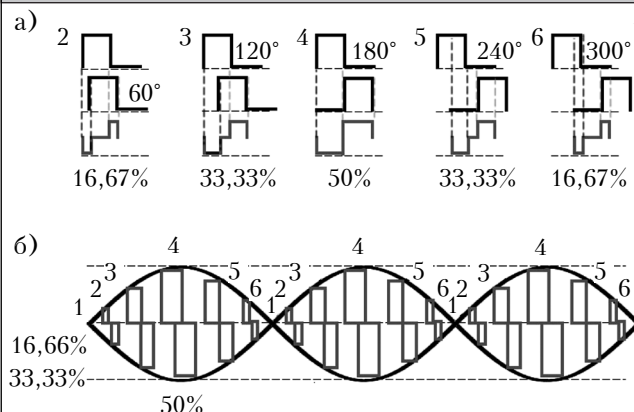


Рис. 2. Полученный с помощью частотного биения периодический сигнал (а) и график тока сформированного выходного сигнала (б)

На рис. 2 приведен периодический сигнал, сформированный с помощью частотного биения напряжения в двух каналах для формирования общего выходного сигнала, и график тока выходного сигнала, сформированного в соответствии с полученными импульсами разной скважности.

Чем больше скважность импульса между первым и вторым выходными каналами, тем большим получается ток воздействия. В итоге, как видно на рис. 2, б, за один период частоты биения ток воздействия возрастает до максимума к середине периода и затем уменьшается до нуля к завершению периода. Такой эффект и создает ударные волны по объекту с требуемой частотой и закручивает в спираль электромагнитное поле в объекте, поскольку с точки зрения электротехники человеческое тело является индуктивным контуром.

Конструкция генератора

Для обеспечения эффекта частотного биения генератор собран на основе двухканальной схемы с использованием двух синтезаторов частоты и соответствующих им усилителями, каждый из которых генерирует свою частоту. На рис. 3 представлена его блок-схема с демонстрацией движения электрического тока от блока питания (аккумулятора) 9 до микроконтроллера 3, а также движения и преобразования тока от дискретизации и разделения на два канала до попадания к пациенту.

В генераторе применен дисплей 1 типа RC1604A-YKY-CSX. Синтезатор сигнала тактовой частоты 2 представлен микросхемой типа AD9833BRW, которая формирует тактирующий сигнал для синтезаторов 5, 6 каналов А и В. В этих каналах формируются импульсы тока, промодулированные по частоте. Выходной сигнал каналов синтезируется микросхемой типа MC34063, а усилители сигнала 7, 8 каналов собраны на основе транзисторов типа KT3130A-9 (входной каскад) и транзисторов типа 2N5817 (выходной каскад).

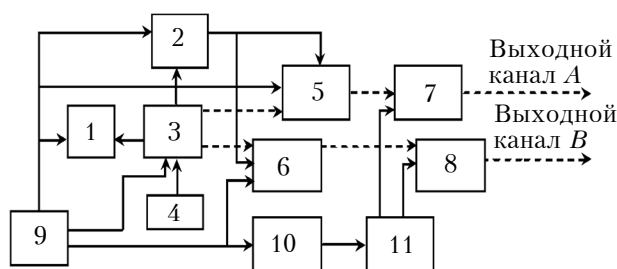


Рис. 3. Блок-схема генератора для электротерапии и стимуляции нервных центров:

1 — дисплей; 2 — синтезатор сигнала тактовой частоты дискретизации до 0,001 Гц; 3 — микроконтроллер; 4 — энкодер; 5, 6 — синтезаторы сигналов в каналах А и В соответственно; 7, 8 — усилители сигналов в каналах А и В соответственно; 9 — аккумулятор (5 В); 10 — преобразователь напряжения (5–24 В); 11 — регулятор напряжения; 12 — регулятор амплитуды выходного сигнала

В качестве микроконтроллера 3 использован прибор фирмы Atmel ATMEGA16, который имеет встроенный контроллер ISP-шины. Микроконтроллер содержит специализированное программное обеспечение для управления работой устройства. Энкодер 4 типа 3315C-101-016L осуществляет запуск работы контроллера при включении прибора, выбор программы с определенным набором частот и установления рабочего значения тока.

Преобразование напряжения с 5 до 24 В осуществляется с помощью микросхемы KS34063 (10). Регулятор напряжения выходного сигнала (регулятор амплитуды) выполнен на основе транзисторов типа BC817 (NPN) и на основе транзисторов типа BC807 (PNP). Общее питание генератора для электротерапии и стимуляции является автономным и осуществляется от аккумулятора 5 В (9), например, типа Gmini mPower Pro Series MPB521.

Передача электрического сигнала к пациенту осуществляется с помощью контактных медных электродов через кабели.

Работа генератора осуществляется следующим образом.

При включении устройства на него подается питание от аккумулятора 9, микроконтроллер 3 инициирует синтезатор сигнала тактовой частоты 2 и формирует запрос на ввод режима работы, который выбирается с помощью энкодера 4 из списка лечебных программ, содержащихся в памяти микроконтроллера. Значение частоты сигнала, продолжительность его действия и величина тока, соответствующие выбранной программе, отображаются на дисплее 1.

После выбора лечебной программы инициализируется синтезатор 2 сигнала тактовой частоты, который формирует тактирующий сигнал для синтезаторов 5, 6 каналов А и В. Электрический сигнал в канале В генерируется с запаздывани-

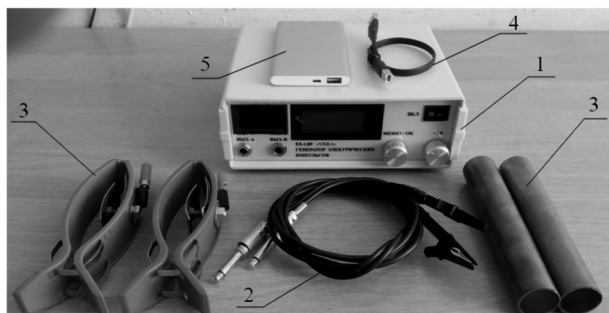


Рис. 4. Внешний вид генератора с комплектом необходимого оборудования:

1 — генератор VEB-1; 2 — шнуры с разъемами JAKC и контактными зажимами для подключения к выходам OUT-A и OUT-B; 3 — контактные площадки (или трубки); 4 — кабель питания с разъемами USB-B и USB-A; 5 — аккумуляторная батарея

Технические характеристики генератора

Уровень выходного сигнала по амплитуде	3,6–16,2 В
Максимальная амплитуда выходного сигнала	16,2 В
Максимально возможный ток воздействия	25 мА
Наличие защиты от повышенного тока (25 мА)	Да
Ток воздействия	8–18 мА
Форма выходного сигнала	Меандр
Диапазон частот воздействия	144–1120 Гц
Напряжение питания	4,8–5,3 В
Время непрерывной работы	не менее 8 ч

ем относительно канала А, что создает эффект частотного биения.

Программное обеспечение прибора задает частоту биения рабочего импульса в диапазоне от 0,01 до 100 Гц с шагом дискретизации в каждом канале не более 0,001 Гц, что обеспечивается синтезатором тактовой частоты 2.

Для эффективного возбуждения нервных центров необходимо обеспечить частотный резонанс между их собственными частотами и частотой рабочих токовых импульсов частотного биения. Экспериментально установлено, что несущая частота рабочих токовых импульсов должна соответствовать 32-й гармонике частоты частотного биения.

Внешний вид генератора приведен на рис. 4, а его технические характеристики — в таблице.

Заключение

Клинические исследования разработанного генератора для электротерапии и стимуляции, который получил название VEB-1, проводились на базе лабораторного комплекса санатория «Молдова» (г. Трускавец). Они показали эффективность прибора по двадцати ха-

рактеристическим показателям состояния здоровья. Выявлено, например, что при стимуляции сакраментального нервного сплетения в результате прохождения курса, состоящего из четырех процедур, у 13 практически здоровых мужчин-добровольцев суммарный прирост тестостерона составил $29 \pm 6\%$; количество микробов, поглощаемых одним фагоцитом, увеличилось на 21% при погрешности 8%.

Генератор VEB-1 соответствует Техническому регламенту безопасности согласно ДСТУ ІЕС 60204-1:2004.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Top 10 Medical Device Trends to Watch in 2017. — Dec. 27, 2016. — 4 p.
2. Powell J., D Pandyan., Granat M., Cameron M., Stott D. Electrical Stimulation of Wrist Extensors in Poststroke Hemiplegia // Stroke: Journal of the American Heart Association. — 1999. — № 30 (7). — P. 1384–1389.
3. Kern H., Carraro U., Adami N., Biral D., Hofer C., Forstner C., Mudlin M., Vogelaier M., Pond A., Boncompagni S., Paolini C., Mayr W., Protasi F., Zampieri S. Home-based functional electrical stimulation rescues permanently denervated muscles in paraplegic patients with complete lower motor neuron lesion // Neurorehabil Neural Repair. — 2010. — №. 24 (8). — P. 709–721.
4. Chantraine A., Baribeault A., Uebelhart D., Gremion G. Shoulder Pain and Dysfunction in Hemiplegia: Effects of Functional Electrical Stimulation // Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. — 1999. № 80. — P. 328–331.
5. Пат. 2164424 РФ. Способ низкочастотной электромагнитной терапии и устройство для его осуществления / Коноплев С.П., Коноплева Т.П. — 27.03.2001. — Бюл. № 11.
6. Пат. ФРГ 4238745. Устройство для генерации магнитного поля с дублированной системой и устройством защиты от помех / Walter Kaufmann. — 19.05.1994.
7. Васильева Л. В., Горьковенко И. А. Низкочастотная электромагнитная терапия альтернатива антибиотикотерапии язвенных поражений желудочно-кишечного тракта // Вестник новых медицинских технологий. — 2103. — Вып 2, Т. XX. — С. 185–187.
8. Прибор импульсной электромагнитной терапии // Вестник спортивных инноваций. — 2012. — № 38. — С. 6.
9. Пат. на полезную модель № 101365 РФ. Устройство для электромагнитной терапии / Шарифов С. К., Соловьев С.В. — 2011. — Бюл. № 2.
10. Пат. Украины на полезную модель № 49957 Портативный прибор для электротерапии и стимуляции / Турчинов А.Н. Волковинская А.А. — 2010. — Бюл. № 9.
11. Бабелюк Н.В., Бабелюк В.Є., Дубкова Г.І. та ін. Модуляція функціональних систем практично здорових чоловіків курсом електростимуляції // IX Міжнародний симпозіум «Актуальні проблеми біофізическої медицини». — 2016. — Україна, м. Київ. — С. 10–11.
12. Бабелюк Н.В., Бабелюк В.Є., Дубкова Г.І. та ін. Електростимуляція приладом «ES–01.9 WEB» активує деякі функціональні системи організму практично здорових чоловіків // Тези доповідей XIV міжнар. наук.-практ. конференції «Валеологія: сучасний стан, напрямки та перспективи розвитку». — 2016. — Україна, м. Харків. — С. 198–200.
13. Бишоп Р. Колебания. — Москва: Наука, 1986.
14. Винницкий А.С. Автономные радиосистемы. — Москва: Радио и связь, 1986.

Дата поступления рукописи
в редакцию 15.02 2017 г.

ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ЕЛЕКТРОТЕРАПІЇ ТА СТИМУЛЯЦІЇ НЕРВОВИХ ЦЕНТРІВ ЛЮДИНИ

Розроблено генератор для електротерапії і стимуляції нервових центрів людини VEB-1, робота якого заснована на стимуляції нервової системи пацієнта струмовими імпульсами з використанням методу частотного биття з точністю підтримки частоти стимуляції не більше 0,001 Гц. Несуча частота робочих струмових імпульсів відповідає 32 гармоніці частоти биття робочих імпульсів. Проведено клінічні випробування, які показали ефективність генератора VEB-1 по двадцяти характеристичним показникам стану здоров'я.

Ключові слова: генератор, електростимуляція, нервовий центр, імпульс струму, частотне биття.

DOI: 10.15222/ТКЕА2017.1-2.23
 UDC 537.39; 621.382; 004.021; 612.8.04

V. E. BABELYUK¹, Yu. G. DOBROVOLSKIY^{2,3},
 I. L. POPOVICH⁴, I. G. KORSUNSKIY²

Ukraine, Truskavets, ¹«Moldova» Resort; Chernivtsy, ²SKB «PDK»

³Yuriy Fedkovich Chernivtsy National University,

⁴Kyiv, Bogomoletz Institute of Physiology of NAS of Ukraine

E-mail: yuriydr@gmail.com

GENERATOR FOR ELECTROTHERAPY AND STIMULATION OF HUMAN NERVE CENTERS

A generator for electrotherapy and stimulation of human VEB-1 nerve centers has been developed. The device's robots are based on stimulation of the patient by current pulses. Frequency beat method is used. The accuracy of maintaining the stimulation frequency is not more than 0.001 Hz. The carrier frequency of the working current pulses corresponds to the 32th harmonic of the frequency of the frequency pulse of the operating pulses. The clinical tests of the VEB-1 generator were carried out, showing the ego efficiency in twenty characteristic health indicators.

Keywords: Generator, electrostimulation, nerve center, current pulse, frequency beats.

REFERENCES

1. Top 10 Medical Device Trends to Watch in 2017, Dec 27, 2016, 4 p.

2. Powell J., D Pandyan., Granat M., Cameron M., Stott D. Electrical Stimulation of Wrist Extensors in Poststroke Hemiplegia. *Stroke: Journal of the American Heart Association*, 1999, no 30 (7), pp. 1384–1389.

3. Kern H., Carraro U., Adami N., Biral D., Hofer C., Forstner C., Mudlin M., Vogelauer M., Pond A., Boncompagni S., Paolini C., Mayr W., Protasi F., Zampieri S. Home-based functional electrical stimulation rescues permanently denervated muscles in paraplegic patients with complete lower motor neuron lesion. *Neurorehabil Neural Repair*, 2010, no. 24 (8), pp. 709–721.

4. Chantraine A., Baribeault A., Uebelhart D., Gremion G. Shoulder Pain and Dysfunction in Hemiplegia: Effects of Functional Electrical Stimulation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 1999, no 80, pp. 328–331.

5. Konoplev S.P., Konopleva T.P. [Method of low-frequency electromagnetic therapy and a device for its implementation]. Patent RF, no 2164424, 2001 (Rus)

6. Kaufmann W. [Device for generating a magnetic field with a duplicated system and an interference protection device]. Patent FRG, no 4238745, 1994. (Rus)

7. Vasilieva L.V., Gorkovenko I. A. [Low-frequency electromagnetic therapy alternative to antibiotic therapy of ulcerative

lesions of the gastrointestinal tract]. *Vestneyk novykh meditsinskikh tekhnologii*, 2010 Iss. 2. vol. XX, pp. 185–187. (Rus)

8. [The device of pulse electromagnetic therapy]. *Vestneyk sportivnykh innovatsii*, 2012, no 38, p. 6. (Rus)

9. Sharifov S.K., Soloviev S.V. [Device for electromagnetic therapy]. Patent RF, no. 101365, 2011. (Rus)

10. Turchinov A.N., Volkovynskaia A.A. [Portable device for electrotherapy and stimulation], Patent UA, no. 49957, 2010. (Rus)

11. Babelyuk N. V., Babelyuk V. E., Dubkova G. I., Kikhtan V. V., Musienko V. Yu., Gubitsky V. Y., Dobrovolsky Yu. G., Korsunsky I. G., Kovbasnyuk M. M., Korolishin T. A., Popovich I. L. [The modularity of functional systems is practically healthy for people with a course of electrostimulation]. *Proceed. of the IX Mizhnarodnii simpozium «Aktualnye problemy biofizicheskoi meditsyny»*, Ukraine, Kyiv, 2016. pp. 10–11. (Ukr)

12. Babelyuk N. V., Babelyuk V. E., Dubkova G. I., Korolishyn T. A., Kikhtan V. V., Dobrovolsky Yu. G., Korsun I. G., Kovbasnyuk M. M. [Electrical stimulation device «ES-01.9 WEB» activates some functional systems of the body healthy men]. *Proceed. of the XIV International Scientific Conference «Valeologiya: current status, trends and prospects of development»*, Ukraine, Kharkiv, 2016, pp.198–190. (Ukr)

13. Byshop R. [Fluctuations]. Moscow, Nauka, 1986, 190 p. (Rus)

14. Vinnitsky A. S. [Autonomous radio systems]. Moscow, Radio and communication, 1986, pp.173–190. (Rus)