

УДК 616.12-009.3-085.842

А.П. Курьята¹, Т.А. Смердова², канд. техн. наук

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

²Национальный университет «Львовская политехника», ул. Степана Бандеры, 12, г. Львов, 79013, Украина.

Сравнительный анализ эффективности дефибриллирующих биполярных импульсов различной формы и длительности

На основе сравнительного анализа энерго-временных характеристик импульсов дефибрилляции и использования энергетического подхода проведено теоретическое исследование эффективности дефибриллирующих биполярных импульсов различной формы и длительности по критерию порога возбуждения мембраны кардиомиоцита.

Исследования показали, что решающим фактором возникновения возбуждения биологического объекта является не пороговая сила тока, а пороговая энергия, которая выделяется током на данном интервале времени при прохождении через вышеуказанный объект.

Полученные результаты совпали с результатами компьютерного моделирования и показали, что самым эффективным (по показателям энерго-временных характеристик) импульсом дефибрилляции является импульс Гурвича-Венина. Полученные результаты подтверждаются исследованиями на животных и в условиях клиники. Библ. 8, рис. 4.

Ключевые слова: дефибрилляция желудочков сердца; фибрилляция желудочков сердца; электрофизиологический подход; энерго-временные характеристики; форма импульса; биполярный синусоидальный импульс; импульс Гурвича-Венина; трапецеидальный импульс; ДФР-02.

Введение

Известно, что электрическая дефибрилляция сердца вот уже почти 70 лет остается одним из высокоэффективных средств современной реанимации и кардиотерапии со времени ее первого клинического применения в 1947 году Клодом Беком для прекращения фибрилляции желудочков сердца. При этом поиск оп-

тимальной формы дефибриллирующего импульса, обеспечивающего успешную дефибрилляцию сердца при минимальной энергии импульса, начался фактически с момента появления первых дефибрилляторов и продолжается по настоящее время. Здесь четко определились две основные тенденции: первая – это использование униполярных импульсов дефибрилляции, вторая – применение биполярных. В 1972 году в СССР было начато производство первого в мире дефибриллятора ДИ-03 с биполярной квазисинусоидальной формой импульса [1], получившего в дальнейшем название «импульс Гурвича-Венина» и признанного во всем мире [2]. Максимальная энергия такого биполярного импульса в 1,5-2,1 раза меньше, чем у дефибрилляторов, генерирующих униполярные импульсы [3]. Сравнение эффективности указанных импульсов исследовались экспериментальным путем на животных (по критериям пороговых значений тока и энергии, устраняющих кратковременную фибрилляцию желудочков), а затем в условиях клиники [4]. Такие эмпирические методы исследования необходимы, однако, они требуют существенных финансовых и временных (не менее 1 года) затрат.

Цель настоящей работы – теоретическое исследование эффективности дефибриллирующих биполярных импульсов различной формы и длительности путем проведения сравнительного анализа их энерго-временных характеристик.

Математические модели импульсов дефибрилляции

В качестве исследуемых импульсов дефибрилляции авторами данной работы использованы четыре биполярных импульса, описанные в [5] и представленные на рис. 1.

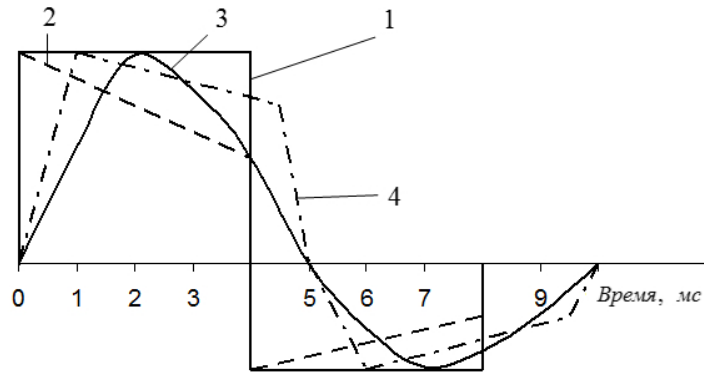


Рис. 1. Форма биполярных импульсов дефибрилляции: 1 – прямоугольный импульс; 2 – трапециевидный импульс; 3 – импульс Гурвича-Венина; 4 – импульс дефибриллятора ДФР-02

Все импульсы имеют равные пиковые значения тока I_{Γ} и коэффициент асимметрии, равный отношению максимального значения отрицательной полуволны к максимальному значению положительной: $m = |I_2|I_1^{-1} = 0,5$. Длительность фаз прямоугольного и трапецеидального импульсов составляла (4+4) мс, а квазисинусоидального импульса Гурвича-Венина и импульса дефибриллятора ДФР-02 – соответственно (5+5) мс.

Описание прямоугольного импульса (рис. 1) имеет следующий вид (1):

$$I_{\Gamma}(x) = I_{\Gamma} \begin{cases} 1 & [0...0,5] \\ -0,5 & [0,5...1,0] \end{cases} \quad (1)$$

где: I_{Γ} – амплитуда тока; $x = t/T_{\Gamma}$ – относительное (безразмерное) значение времени; $T_{\Gamma} = 8$ мс – длительность прямоугольного импульса.

Математическая модель трапецеидального импульса описывается выражением (2):

$$I_m(x) = I_m \begin{cases} -x+1 & [0...0,5] \\ 0,5(x-1,5) & [0,5...1,0] \end{cases} \quad (2)$$

где: $I_m = I_{\Gamma}$ – амплитуда тока; $x = t/T_m$; $T_m = T_{\Gamma} = 8$ мс.

Математической моделью импульса Гурвича-Венина является экспоненциально-затухающая синусоида (3):

$$I_{\Gamma B}(x) = 1,38I_{\Gamma B}e^{-aT_{\Gamma B}x} \sin 2\pi x \quad [0...1] \quad (3)$$

где: $I_{\Gamma B} = I_{\Gamma}$ – амплитуда тока; $x = t/T_{\Gamma B}$; $T_{\Gamma B} = 10$ мс – длительность импульса; $aT_{\Gamma B} = 1,39$ – параметр, характеризующий затухание экспоненты и определяющий коэффициент m асимметрии импульса.

Указанный коэффициент m можно найти из выражения (4):

$$aT_{\Gamma B} = -2\ln m \quad (4)$$

Модель импульса дефибрилляции ДФР-02 описывается выражением (5):

$$I_{\text{ДФ}}(x) = I_{\Gamma} \begin{cases} 10x & [0...0,1] \\ 0,94(x+1,16) & [0,1...0,42] \\ 4,38(-2x+1) & [0,42...0,5] \\ 2,5(-2x+1) & [0,5...0,6] \\ 0,47(x-1,66) & [0,6...0,92] \\ 4,39(x-0,92) & [0,92...1] \end{cases} \quad (5)$$

где: I_{Γ} – амплитуда импульса; $x = t/T_{\text{ДФ}}$; $T_{\text{ДФ}} = 10$ мс – длительность импульса.

Расчет энергoвременных характеристик импульсов дефибрилляции

Энергия E , выделяемая дефибриллирующим импульсом на пациенте, равна

$$E = R \int_0^{\infty} I^2(t) dt, \quad (6)$$

где R – сопротивление грудной клетки.

В работе [6] использован такой энергетический подход для сравнения эффективности

различных импульсов дефибрилляции по критерию порога возбуждения мембраны (т.н. электрофизиологический подход). Знание энергетических особенностей импульса не определяет всех его черт, но зато энергетическое рассмотрение ряда различных импульсов позволяет установить как общие черты, их объединяющие, так и их различие.

Авторами данной работы предлагается дальнейшее развитие энергетического подхода путем исследования текущей энергии $E(t)$, которая является энерговременной характеристикой импульса и определяется соотношением (7) [7]:

$$E(t) = \int_0^t f^2(t) dt \quad (7)$$

Скорость изменения энергии импульса в любой момент времени является его энергоскоростной характеристикой и определяется как производная текущей энергии по времени $dE(t)/dt$.

Интегральной характеристикой является временная энергоскоростная характеристика импульса $\Psi(t)$, которая определяется в соответствии с выражением (8) [8]:

$$\Psi(t) = E(t) \frac{dE}{dt} \quad (8)$$

Исследования показали, что решающим фактором возникновения возбуждения биообъекта является не пороговая сила тока, а пороговое значение энергии, которая выделяется током на данном интервале времени при прохождении через биообъект. Отметим, что функция $\Psi(t)$ характеризует не только величину энергии, но и скорость ее изменения во времени, что особенно важно при срабатывании различных пороговых устройств, и прежде всего, биологических.

Исходя из представленных моделей импульсов и соотношений (7) и (8), найдем их энерговременные характеристики и производные текущей энергии. При этом величины $E(x)$

и $\frac{dE(x)}{dx}$ при сопротивлении нагрузки R для прямоугольного импульса будут определяться выражениями (9, 10):

$$E_{\Pi}(x) = I_{\Pi}^2 R T_{\Pi} \begin{cases} x & [0...0,5] \\ 0,5[0,25(x-1)+1] & [0,5...1,0] \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{dE_{\Pi}(x)}{dx} = I_{\Pi}^2 R \begin{cases} 1 & [0...0,5] \\ 0,25 & [0,5...1,0] \end{cases} \quad (10)$$

для трапецеидального импульса – соответственно выражениями (11, 12):

$$E_T(x) = I_T^2 R T_T \begin{cases} x(0,33x^2 - x + 1) & [0...0,5] \\ x(0,083x^2 - 0,375x + 0,562) - 0,198 & [0,5...1,0] \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{dE_T(x)}{dx} = I_T^2 R \begin{cases} x^2 - 2x + 1 & [0...0,5] \\ 0,25x^2 - 0,75x + 0,562 & [0,5...1,0] \end{cases} \quad (12)$$

для импульса Гурвича-Венина – выражениями (13, 14):

$$E_{ГВ}(x) = 0,34 I_{ГВ}^2 T_{ГВ} \left\{ 1 - e^{-2,78x} - 0,047 \left[1 - e^{-2,78x} (\cos 4\pi x - 4,52 \sin 2\pi x) \right] \right\} \quad (13)$$

$$\frac{dE_{ГВ}(x)}{dx} = 1,9 I_{ГВ}^2 R e^{-2,78x} \sin 2\pi x \quad (14)$$

для импульса дефибрилляции ДФР-02 – выражениями (15, 16):

$$E_{ДФ}(x) = I_{ДФ}^2 R T_{ДФ} \begin{cases} 33,3x^3 & [0...0,1] \\ 1,19x(0,24x^2 - 0,86x + 1) - 0,076 & [0,1...0,42] \\ 19,1x(1,33x^2 - 2x + 1) - 2,91 & [0,42...0,5] \\ 6,25x(1,33x^2 - 2x + 1) - 0,76 & [0,5...0,6] \\ 0,607x(0,12x^2 - 0,6x + 1) + 0,04 & [0,6...0,92] \\ 16,2x(0,39x^2 - 1,09x + 1) - 4,61 & [0,92...1] \end{cases} \quad (15)$$

$$\frac{dE_{ДФ}(x)}{dx} = I_{ДФ}^2 R \begin{cases} 100x^2 & [0...0,1] \\ 0,86x^2 - 2,05x + 1,19 & [0,1...0,42] \\ 19,05x^2 - 32,8x + 19,1 & [0,42...0,5] \\ 6,25(4x^2 - 4x + 1) & [0,5...0,6] \\ 0,22x^2 - 0,73x + 0,607 & [0,6...0,92] \\ 19x^2 - 35,3x + 16,2 & [0,92...1,0] \end{cases}$$

Сопротивление нагрузки R определяется сопротивлением грудной клетки и у взрослых больных меняется в широком диапазоне (от 33 Ом до 170 Ом) и оказывает влияние на форму (амплитуду и длительность) дефибриллирующих импульсов.

Анализ полученных результатов

Изменение текущей энергии четырех видов дефибриллирующих импульсов (рис. 1) представлено на рис. 2, а скорость ее изменения – на рис. 3. Импульс Гурвича-Венина имеет наименьшее значение текущей энергии $E(x)$, которая в 1,6 раза меньше по сравнению с прямоугольным импульсом. Скорость изменения текущей энергии импульса Гурвича-Венина подчиняется экспоненциально затухающей синусоиде.

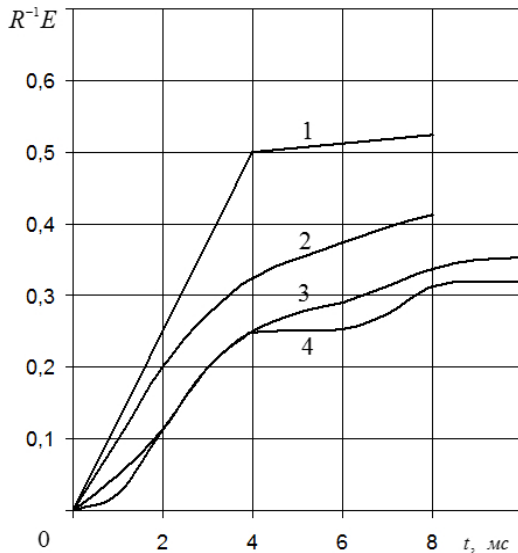


Рис. 2. Текущая энергия $E(x)$ прямоугольного (1), трапецидального (2), импульса Гурвича-Венина (3) и импульса ДФР-02 (4)

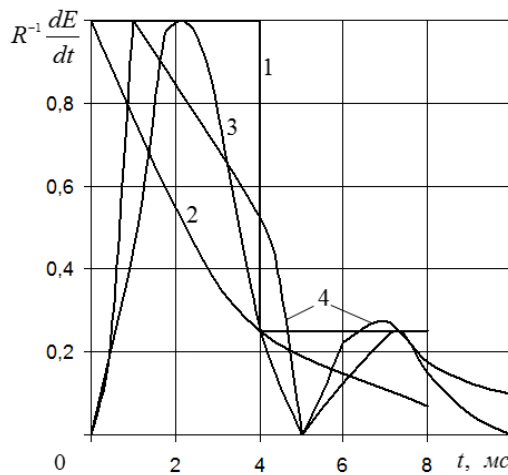


Рис. 3. Производные текущей энергии $\frac{dE(t)}{dt}$ импульсов: прямоугольного (1), трапецидального (2), Гурвича-Венина (3) и дефибриллятора ДФР-02 (4)

Значения максимумов этой кривой зависят от коэффициента асимметрии импульса. При $m=1$ их значения становятся равными, а с уменьшением m значение второго максимума также уменьшается.

На рис. 4 представлены временные энергоскоростные характеристики $\Psi(t)$ четырех рассмотренных выше импульсов дефибрилляции.

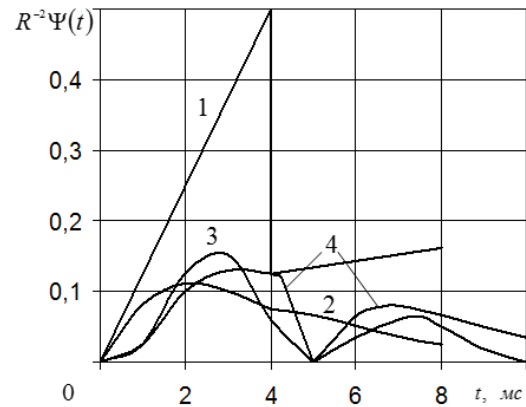


Рис. 4. Временные энергоскоростные характеристики $\psi(t)$ импульсов: прямоугольного (1), трапецидального (2), Гурвича-Венина (3) и дефибриллятора ДФР-02 (4)

Характеристика $\psi(t)$ импульса Гурвича-Венина имеет два четко выраженных экстремума, разнос которых составляет 4 мс, и резко отличается от аналогичных характеристик прямоугольного и трапецидального импульсов. Эта характеристика отражает две фазы в процессе дефибрилляции. При этом значение $\psi(t)$ первой фазы импульса в два раза превышает это же значение второй фазы. Характеристика $\psi(t)$ импульса дефибриллятора ДФР-02 является подобной характеристике импульса Гурвича-Венина. Значение первого экстремума ее на 20% меньше по сравнению с характеристикой импульса Гурвича-Венина, а второго экстремума - на 20% больше. Следует отметить, что в процессе дефибрилляции первая фаза биполярного импульса играет ведущую роль. При этом она выделяет на область сердца не менее (70-80)% энергии импульса, а вторая - не более (20-30%). Это подтвердил анализ импульсов дефибрилляции Гурвича-Венина и ДФР-02. Полученные результаты совпали с результатами компьютерного моделирования возбуждения мембраны кардиомиоцита (модель Luo-Rudy) [6] и показали, что самым эффективным (с точки зрения энергетических показателей) импульсом дефибрилляции является импульс Гурвича-Венина.

Выводы

Проведенный сравнительный анализ эффективности биполярных дефибриллирующих

импульсов по показателю энерговременных характеристик показал, что импульс Гурвича-Венина является наиболее эффективным, что подтверждается также экспериментальными и клиническими исследованиями [2-4]. Этот импульс, как утверждается в работе [6], является “золотым стандартом” для дефибрилляции желудочков сердца. Широкое применение в клинической практике данной формы импульса дефибрилляции позволит за счет увеличения эффективности низкоэнергетических разрядов уменьшить их количество и, как следствие, минимизировать повреждение миокарда, а также повреждение тканей, расположенных под электродами.

Список использованных источников

1. *Венин И.В., Гурвич Н.Л., Либерзон А.П., Табак В.Я., Цукерман Б.М., Шерман А.М.* Дефибрилляторы ДИ – 03 и ДКИ – 01 // *Новости медицинского приборостроения*. 1973. Вып. 3. – М.: - С.48-53.
2. *Востриков В.А., Сыркин А.Л., Холин П.В., Разумов К.В.* Внутрибольничная дефибрилляция желудочков сердца: эффективность биполярного синусоидального импульса // *Кардиология*. 2003. №12. – С. 18-23.
3. *Negovsky V.A., Smerdov A.A., Tabak V.Y., Venin I.V.* Criteria of efficiency and safety of the defibrillating impulse // *Resuscitation*. 1980. №8. – P. 53-67.
4. *Востриков В.А.* Эффективность и безопасность электрической дефибрилляции желудочков сердца: эксперимент и клиника // *Общая реаниматология*. 2012. №8. – С. 79-87.
5. *Востриков В.А., Горбунов Б.Б.* Сравнительный анализ частотных характеристик дефибриллирующих импульсов биполярной формы // *Клиническая анестезиология и реаниматология*. 2004. Т. 1. №3. – С. 16-18.
6. *Востриков В.А., Горбунов Б.Б., Гусев А.И.* Компьютерное моделирование воздействия первых фаз дефибриллирующих импульсов биполярной формы на мембрану кардиомиоцита // *Общая реаниматология*. 2014. Т. X. №1. – С. 25-28.
7. *Харкевич А.А.* Спектры и анализ. Избранные труды. Т. 2. – М.: Наука, 1973. – 566 с.
8. *Tatyana Smerdova.* Energy-time of defibrillation waveforms // *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science*. Матеріали Міжнародної конференції TCSET'2014, 25 лютого-01 березня 2014, Львів-Славське, Україна. – С. 716-718.

Поступила в редакцию 20 сентября 2014 г.

УДК 616.12-009.3-085.842

А.П. Кур'ята¹, Т.А. Смердова², канд. техн. наук

¹Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут», вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

²Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна.

Порівняння ефективності дефібрилюючих біполярних імпульсів різної форми і тривалості

На основі аналізу енергочасових характеристик імпульсів дефібриляції і використання енергетичного підходу проведено теоретичне дослідження порівняльної ефективності дефібрилюючих біполярних імпульсів різної форми та тривалості за критерієм порогу збудження мембрани кардіоміоциту.

Дослідження показали, що вирішальним фактором виникнення збудження біооб'єкту є не порогова сила струму, а порогова енергія, яка виділяється струмом на даному інтервалі часу при проходженні через вищевказаний об'єкт.

Отримані результати співпали з результатами комп'ютерного моделювання і показали, що самим ефективним (за показниками енергочасових характеристик) імпульсом дефібриляції є: імпульс Гурвича-Венина. Отримані результати підтверджуються дослідженнями на тваринах і в умовах клініки. Бібл. 8, рис. 4.

Ключові слова: *дефібриляція шлуночків серця; фібриляція шлуночків серця; електрофізіологічний підхід; енергочасові характеристики; форма імпульсу; біполярний синусоїдальний імпульс; імпульс Гурвіча-Веніна; трапецеїдальний імпульс; ДФР-02.*

UDC 616.12-009.3-085.842

A.A. Kuriata¹, T.A. Smerdova², Ph.D.

¹National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”,
st. Polytechnique, 16, Kiev, 03056, Ukraine.

²Lviv Polytechnic National University,
st. Stepan Bandera, 12, Lviv, 79013, Ukraine.

Comparison of defibrillation efficacy of different shape and duration bipolar pulses

Based on the analysis of energy-time pulse defibrillation characteristics and use of energy approach to compare the effectiveness of different pulses by cardiac muscle cell membrane excitation threshold, a theoretical study of the comparative effectiveness of defibrillation bipolar pulses of different shapes and durations.

Research has shown that a critical factor of the bioobject is no excitation current strength threshold, and the threshold quantity of energy which is released at this current time interval when passing through the object.

The obtained results coincided with the simulation results showed that the most effective defibrillation pulses are: Gurvich-Venin pulse and defibrillator FID-02 pulse. The results obtained are confirmed by animal studies and in clinical studies. Reference 8, figures 4.

Keywords: *ventricular defibrillation of the heart; ventricular fibrillation; electrophysiological approach energy-time characteristics; pulse shape; bipolar sinusoidal pulse; Gurvich-Venin pulse; trapezoidal pulse; the FID-02.*

Reference

1. Venin I.V., Gurvich N.L., Liberzon A.P., Tabak V.Y., Tsukerman B.M., Sherman A.M. (1973), “Defibrillators DI – 03 and DKI – 01”. *Novosti meditsinskogo priborostroeniya*. Vol.3, pp. 48-53. (Rus)
2. Vostrikov V.A., Syirkin A.L., Holin P.V., Razumov K.V. (2003), “Nosocomial cardiac ventricular defibrillation: efficacy of bipolar sinusoidal pulse”. *Kardiologiya*. Vol.12, pp.18-23. (Rus)
3. Negovsky V.A., Smerdov A.A., Tabak V.Y., Venin I.V. (1980), “Criteria of efficiency and safety of the defibrillating impulse”. *Resuscitation*. Vol.8, pp. 53-67.
4. Vostrikov V.A. (2012), “Efficacy and safety of electrical defibrillation of the heart ventricles: experiment and clinic”. *Obschaya reanimatologiya*. Vol.8, pp. 79-87. (Rus)
5. Vostrikov V.A., Gorbunov B.B. (2004), “Efficacy and safety of electrical defibrillation of the heart ventricles: experiment and clinic”. *Klinicheskaya anesteziologiya i reanimatologiya*. pp.16–18. (Rus)
6. Vostrikov V.A., Gorbunov B.B., Gusev A.I. (2014), “Computer modeling of the impact of the first phases of defibrillation pulse bipolar membrane forms on cardiomyocyte”. *Obschaya reanimatologiya*. Vol.1, pp.25-28. (Rus)
7. Harkevich A.A. (1973), “Spectra and analysis”. *Izbrannyye trudy*. Vol.2, P. 566. (Rus)
8. Smerdova T.A. (2014), “Energy-time of defibrillation waveforms”. *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science*, pp. 716-718.