

## АНАЛИЗ БИПОЛЯРНОГО ИМПУЛЬСА ДЕФИБРИЛЛЯТОРА DEFIGARD 5000

В. А. Востриков<sup>1</sup>, Б. Б. Горбунов<sup>2</sup>, К. А. Мамекин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский центр Московской медицинской академии (НИЦ ММА) им. И. М. Сеченова, отдел кардиологии, Москва

<sup>2</sup> Московский государственный институт электронной техники (технический университет) (МИЭТ), Зеленоград, Москва

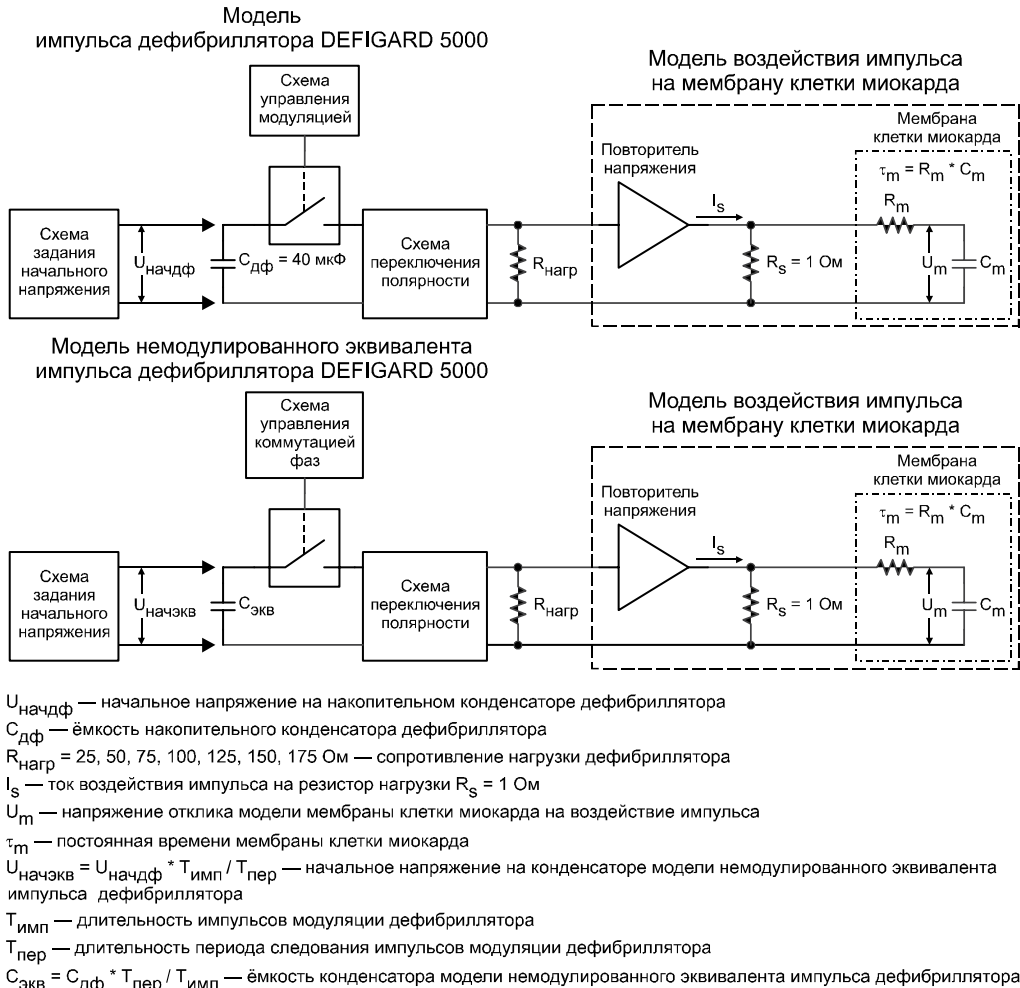
Проанализировано воздействие модулированного биполярного импульса дефибриллятора DEFIGARD 5000 на модель мембраны клетки миокарда. Моделированием выявлено, что немодулированный эквивалент импульса дефибриллятора DEFIGARD 5000, вызывающий идентичный отклик мембраны клетки миокарда, имеет меньшую энергию, чем сам импульс дефибриллятора. Сделано предположение, что применение модуляции при формировании импульса дефибрилляции будет увеличивать пороговую энергию, необходимую для устранения фибрилляции желудочков, т. е. снижать эффективность дефибрилляции. Это предположение подтверждается в экспериментальных исследованиях на животных.

### ВВЕДЕНИЕ

Применяемые в кардиологии и реанимации для восстановления нормального сердечного ритма дефибрилляторы фирмы SCHILLER MEDICAL S.A.S. являются единственными в мире аппаратами, формирующими модулированный биполярный импульс. Желание разобраться в преимуществах или недостатках модуляции импульса дефибрилляции побудило проанализировать импульс дефибриллятора DEFIGARD 5000, выпускаемого этой фирмой.

### МЕТОД

Форму биполярного импульса дефибриллятора DEFIGARD 5000 с серийным номером 101998002275 энергией 150 Дж регистрировали на сопротивлениях нагрузки  $R_{\text{нагр}} = 25, 50, 75, 100, 125, 150$  и  $175$  Ом с помощью цифрового осциллографа. Выбранный ряд значений сопротивлений нагрузки соответствует требованиям (IEC 60601-2-4..., 2002) в части приводимых в техническом описании графиков выдачи энергии, таких как ток – время или напряжение – время. На основании полученных данных строились PSpice-модели (Cadence PSpice A/D...) воздействия на мембрану клетки миокарда импульса дефибриллятора, а также его немодулированного эквивалента, вызывающего аналогичный отклик мембраны клетки миокарда (Krasteva et al., 2000). При построении PSpice-модели импульса учитывалось, что в дефибрилляторе DEFIGARD 5000 в качестве накопителя энергии используется конденсатор ёмкостью  $40$  мкФ (максимальное напряжение  $3100$  В) (DEFIGARD 5000..., 2005a). Функциональные схемы



$U_{начдф}$  — начальное напряжение на накопительном конденсаторе дефибриллятора

$C_{дф}$  — ёмкость накопительного конденсатора дефибриллятора

$R_{нагр} = 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 \text{ Ом}$  — сопротивление нагрузки дефибриллятора

$I_S$  — ток воздействия импульса на резистор нагрузки  $R_S = 1 \text{ Ом}$

$U_m$  — напряжение отклика модели мембраны клетки миокарда на воздействие импульса

$\tau_m$  — постоянная времени мембраны клетки миокарда

$U_{начэвк} = U_{начдф} * T_{имп} / T_{пер}$  — начальное напряжение на конденсаторе модели немодулированного эквивалента импульса дефибриллятора

$T_{имп}$  — длительность импульсов модуляции дефибриллятора

$T_{пер}$  — длительность периода следования импульсов модуляции дефибриллятора

$C_{эвк} = C_{дф} * T_{пер} / T_{имп}$  — ёмкость конденсатора модели немодулированного эквивалента импульса дефибриллятора

**Рис. 1.** Модели импульсов дефибриллятора DEFIGARD 5000, его немодулированного эквивалента и модели воздействия их на мембрану клетки миокарда

этих моделей представлены на рис. 1. Длительность каждой из фаз немодулированного эквивалента импульса дефибриллятора задана равной сумме длительности соответствующей фазы самого импульса и длительности паузы между импульсами модуляции.

Для данных моделей методом характеристической энергии<sup>1</sup> (Горбунов, 2009) вычисляли энергию первой фазы импульса и первой фазы его немодулированного эквивалента при постоянной времени мембраны клетки миокарда  $\tau_m = 3,2 \text{ мс}$ . Это значение  $\tau_m$  было взято для того, чтобы можно было сравнивать

<sup>1</sup> Характеристическая энергия — это энергия импульса, выделяемая на сопротивлении нагрузки  $R_S$  величиной 1 Ом в моделях, представленных на рис. 1, необходимая для получения амплитуды отклика  $U_m$ , равной 1 В.

первую фазу изучаемого импульса с другими видами монополярных импульсов дефибрилляции, представленных в работе (Горбунов, 2009). Первая фаза биполярного импульса была исследована из расчёта, что в ней выделяется около 70 % от полной энергии импульса (Горбунов, 2009).

### ФОРМА ИМПУЛЬСА ДЕФИБРИЛЛЯТОРА DEFIGARD 5000 В ДИАПАЗОНЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ НАГРУЗКИ

Значения параметров импульса дефибриллятора DEFIGARD 5000 в зависимости от сопротивления нагрузки представлены в табл. 1. Диапазон изменения значений  $\tau_m$  взят из работы (Kroll, Swerdlow, 2007). На рис. 2–5 представлены формы импульса дефибриллятора DEFIGARD 5000 при сопротивлениях нагрузки  $R_{\text{нагр}} = 25, 50, 100$  и  $150$  Ом соответственно; формы немодулированных эквивалентов этих импульсов и вид откликов мембран клеток миокарда на их воздействие для различных значений  $\tau_m$ . Амплитудой первой фазы импульсов задана величина, равная 1 А.

Как видно на рис. 2–5, модуляция импульса сильно сглаживается на мембранах клеток миокарда во всём диапазоне возможных значений  $\tau_m$ . Это связано с тем, что значение  $\tau_m$  (2...5 мс) намного больше длительности периода частоты импульсов модуляции (0,15...0,55 мс). Поэтому немодулированный эквивалент импульса дефибрилляции вызывает отклик мембраны клеток миокарда, практически идентичный отклику на сам импульс.

Длительность первой и второй фаз исследуемого импульса для сопротивлений нагрузки 25, 50, 75 и 100 Ом составляет соответственно около 4 и 3 мс. Для сопротивлений нагрузки 125, 150 и 175 Ом длительность первой и второй фаз импульса отличается от приведённой на рисунке в разделе “Defibrillation Pulse” документа (DEFIGARD 5000..., 2005б) и составляет 6 и 3,25 мс соответственно. Это объясняется простой физической зависимостью: при высоких сопротивлениях нагрузки без увеличения длительности импульса нельзя получить от накопительного конденсатора, применяемого в данном дефибрилляторе, энергию, равную 180 Дж.

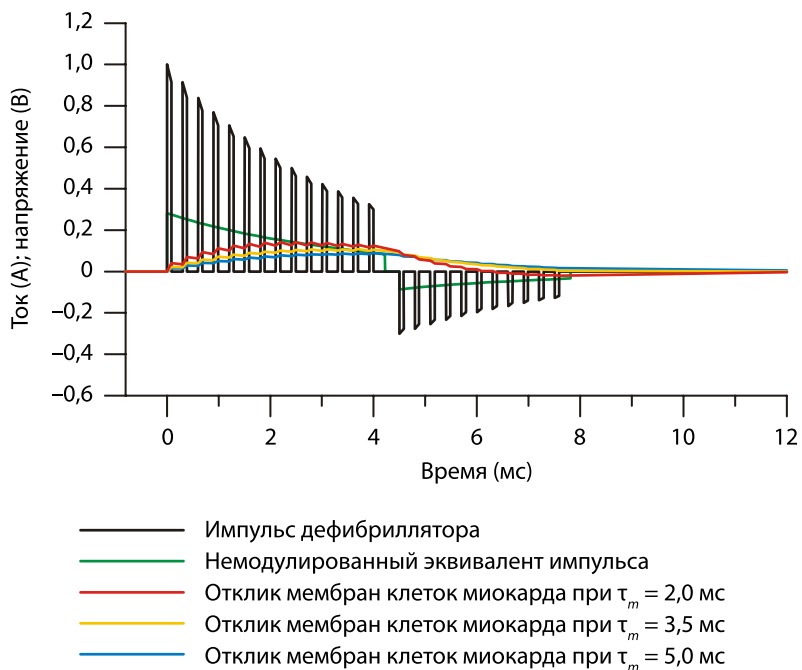
Из данных табл. 1 следует, что при всех значениях сопротивления нагрузки характеристическая энергия первой фазы модулированного импульса превышает характеристическую энергию её немодулированного эквивалента. При этом отношение характеристической энергии первой фазы модулированного импульса к характеристической энергии её немодулированного эквивалента приблизительно равно отношению длительности периода следования импульсов модуляции к длительности импульсов модуляции. Таким образом, модель воздействия импульса дефибрилляции на мембраны клеток миокарда, представленная в работе (Krsteva et al., 2000), выявляет достаточно серьёзные недостатки модулированного импульса дефибриллятора DEFIGARD 5000 по сравнению с его немодулированным эквивалентом. Для более наглядного примера в табл. 2 приведены параметры импульса дефибриллятора энергией 150 Дж и его немодулированного эквивалента.

**Таблица 1.** Значения параметров импульса дефибриллятора DEFIGARD 5000 в зависимости от сопротивления нагрузки

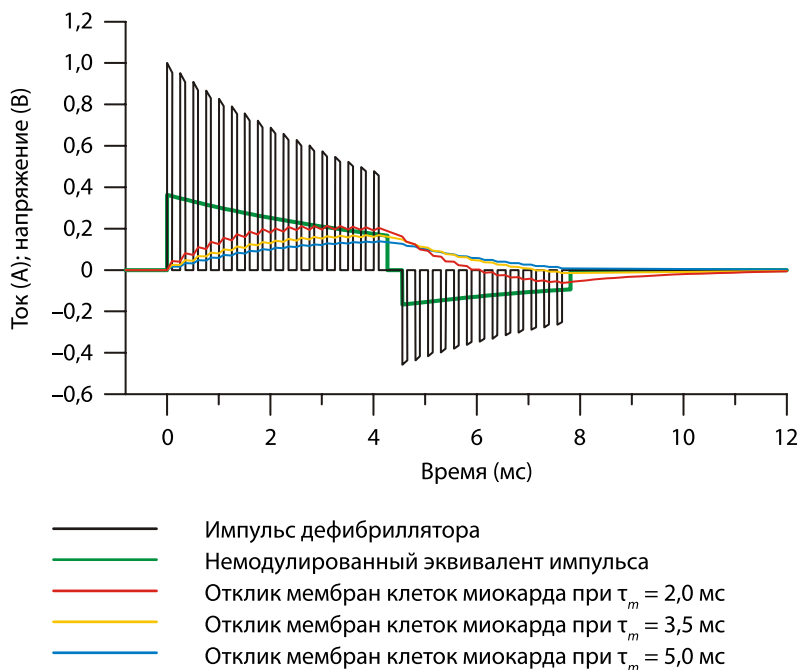
Параметр	Значение параметра при сопротивлении нагрузки (Ом)						
	25	50	75	100	125	150	175
Длительность периода следования импульсов модуляции (мкс)	301	250	150	198	554		
Частота модуляции (кГц)	3,32	4,00	6,67	5,05	1,81		
Длительность импульсов модуляции (мкс)	85	91	91	135	460		
Отношение длительности периода следования импульсов модуляции к длительности импульсов модуляции	3,54	2,75	1,65	1,47	1,20		
Длительность первой фазы импульса (мс)	4,00	4,10	3,85	4,10	6,00		
Длительность паузы между фазами импульса (мс)	0,50	0,45	0,36	0,35	0,40		
Длительность второй фазы импульса (мс)	3,10	3,10	2,95	3,10	3,25		
Количество импульсов модуляции в первой фазе	14	17	26	21	11		
Количество импульсов модуляции во второй фазе	11	13	20	16	6		
Отношение амплитуды второй фазы импульса к первой	0,30	0,46	0,45	0,49	0,36	0,43	0,48
Характеристическая энергия первой фазы импульса при $\tau_m = 3,2$ мс (мДж)	35,2	25,3	15,5	13,6	12,8	12,6	12,3
Характеристическая энергия первой фазы немодулированного эквивалента импульса при $\tau_m = 3,2$ мс (мДж)	10,7	9,8	9,7	9,5	11,0	10,8	10,5
Отношение характеристической энергии первой фазы импульса к характеристической энергии первой фазы его немодулированного эквивалента	3,28	2,59	1,60	1,43	1,17	1,17	1,17

**Таблица 2.** Параметры импульса дефибриллятора DEFIGARD 5000 с энергией 150 Дж и его немодулированного эквивалента в зависимости от сопротивления нагрузки

Параметр	Значение параметра при сопротивлении нагрузки (Ом)						
	25	50	75	100	125	150	175
<i>Импульс дефибриллятора DEFIGARD 5000 с энергией 150 Дж</i>							
Амплитуда напряжения первой фазы (В)	2760	2830	2830	2860	2800	2850	2900
Амплитуда тока первой фазы (А)	110	57	38	29	22	19	17
<i>Немодулированный эквивалент импульса дефибриллятора DEFIGARD 5000 с энергией 150 Дж</i>							
Амплитуда напряжения первой фазы (В)	780	1030	1710	1950	2330	2360	2410
Амплитуда тока первой фазы (А)	31	21	23	19	19	16	14
Энергия импульса (Дж)	42	55	91	102	125	125	125
Отношение энергии импульса к 150 Дж (%)	28	36	61	68	83	83	83



**Рис. 2.** Импульс дефибриллятора DEFIGARD 5000 при нагрузке 25 Ом



**Рис. 3.** Импульс дефибриллятора DEFIGARD 5000 при нагрузке 50 Ом

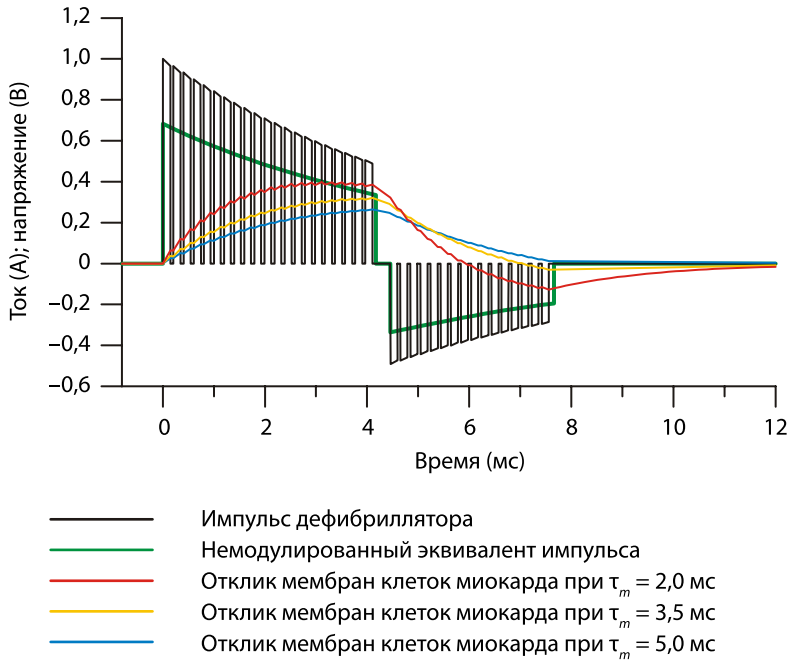


Рис. 4. Импульс дефибриллятора DEFIGARD 5000 при нагрузке 100 Ом

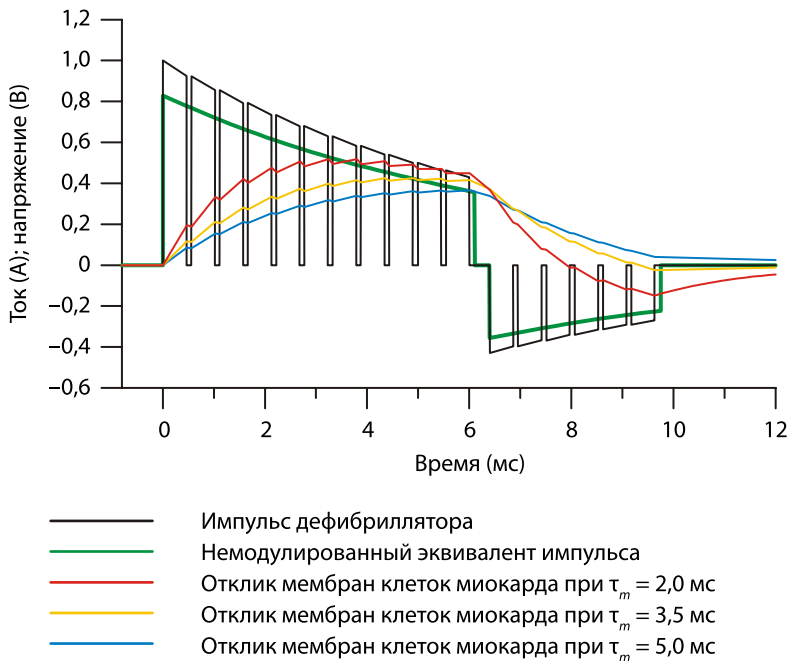


Рис. 5. Импульс дефибриллятора DEFIGARD 5000 при нагрузке 150 Ом

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов, полученных в данной работе, следует, что немодулированный эквивалент импульса дефибриллятора DEFIGARD 5000, вызывающий идентичный отклик мембраны клетки миокарда, имеет меньшую энергию, чем сам импульс дефибриллятора. При этом отношение энергии модулированного импульса к энергии его немодулированного эквивалента приблизительно равно отношению длительности периода следования импульсов модуляции к их длительности. Следовательно, можно предположить, что применение модуляции при формировании импульса дефибрилляции будет увеличивать пороговую энергию, необходимую для устранения фибрилляции желудочков, т. е. снижать его эффективность. Это предположение подтверждается в экспериментальных исследованиях на животных (*Sullivan et al.*, 2005; *Sullivan et al.*, 2007).

## ЛИТЕРАТУРА

- Горбунов Б. Б.* (2009) Метод характеристической энергии для сравнения эффективности монополярных импульсов дефибрилляции // Мед. техника. 2009. № 2. С. 8–13.
- Cadence PSpice A/D and Advanced Analysis [Электрон. текстовые и графич. дан.] Режим доступа: [http://www.cadence.com/products/orcad/pspice\\_simulation/](http://www.cadence.com/products/orcad/pspice_simulation/)
- IEC 60601-2-4. 2002. Medical electrical equipment. Pt. 2–4: Particular requirements for the safety of cardiac defibrillators [Электрон. текстовые и графич. дан.] Режим доступа: <http://electronics.ihs.com/document/abstract/OLOCFBAAAAAAAAAAAA>.
- Krasteva V., Cansell A., Daskalov I.* (2000) Modelling transthoracic defibrillation waveforms // J. Medical Engineering and Technology. Mar./Apr. 2000. V. 24. Nr. 2. P. 63–67.
- DEFIGARD 5000 (2005a) Defibrillator and Monitor: Service Manual. SCHILLER MEDICAL S.A.S. Pt. 0-48-0065. Ver. 01.00. June 2005.
- DEFIGARD 5000 (2005b) Defibrillator and Monitor: User Guide. SCHILLER MEDICAL S.A.S. Art. no.: 0-48-0060 Rev.: a, 05.12.2005.
- Kroll M. W., Swerdlow C. D.* (2007) Optimizing defibrillation waveforms for ICDs // J. Interventional Cardiac Electrophysiology. 2007. V. 18. P. 247–263.
- Sullivan J. L., Melnick S. B., Chapman F. W., Walcott G. P.* (2007) Porcine defibrillation thresholds with chopped biphasic truncated exponential waveforms // Resuscitation. Aug. 2007. V. 74. Iss. 2. P. 325–331.
- Sullivan J. L., Shmitt P. W., Melnik S., Walcott G. P., Idecker R. E.* (2005) Porcine defibrillation thresholds with chopped biphasic waveforms // Abstr. Scientific Sessions 2005, Dallas Convention Center. Dallas, Texas. Nov. 13–16, 2005; Circulation. Oct. 2005. V. 112. Nr. 17. Suppl. 2. P. II-1115.

## ANALYSIS OF BIPHASIC PULSE OF DEFIGARD 5000 DEFIBRILLATOR

V. A. Vostrikov<sup>1</sup>, B. B. Gorbunov<sup>2</sup>, K. A. Mamekin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Research Center of Sechenov Moscow Medical Academy, Department of Cardiology*

<sup>2</sup> *Moscow Institute of Electronic Technology (Technical University)  
(MIET), Zelenograd, Moscow*

The analysis of the influence of the modulated bipolar impulse of the defibrillator DEFIGARD 5000 on the model of a myocardium cell membrane is presented. Our simulation results show that not modulated pulse equivalent of defibrillator DEFIGARD 5000 induced identical response of a myocardium cell membrane has smaller energy than defibrillator pulse *per se*. It is suggested that the modulated defibrillation pulse waveform increases the energy threshold required for elimination of ventricular fibrillation, i.e. reduces efficiency of defibrillation. This suggestion has proved to be true in experimental studies in animals.