

АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА БИОПРОЦЕССОВ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИБОРОВ В КЛИНИКЕ

С. П. Булгаков,
Б. М. Цукерман,
Д. В. Шаргородская

УДК 615.471 : 616.12-008-07 : 51

Статистический анализ R-R-интервалов ЭКГ при некоторых видах нарушений сердечного ритма

Большинство диагностических алгоритмов нарушений ритма основаны на использовании признаков, применяемых в клинике для выявления аритмий. Однако важнейший из них — выделение зубца R, определение его полярности и положения в сердечном цикле, автоматически проводится плохо и с большим количеством ошибок [7], поэтому представляет интерес изыскание признаков ЭКГ, легко выделяемых автоматически. Привлекательным с этой точки зрения представляется анализ последовательных R-R-интервалов. Он еще мало используется в клинике для диагностики аритмий, тем не менее может оказаться весьма информативным, о чем свидетельствуют исследования ряда авторов [2—6].

В настоящей работе проведен комплексный анализ последовательного ряда R-R-интервалов у больных с желудочковой экстрасистолой и мерцательной аритмией с целью выявления отличий статистических характеристик при этих видах нарушений ритма от синусового ритма.

Для изучения состояния сердечно-сосудистой системы у людей с нарушением сердечного ритма проводили электрокардиографические исследования. ЭКГ-отведения выбирали из соображений получения максимального R-зубца. Регистрация ЭКГ на магнитный носитель проводилась у пациентов в положении лежа. Продолжительность записи составляла 1,5—3 мин. Записи R-R-интервалов ЭКГ использовали для статистической обработки межимпульсных интервалов. Информацию о R-R-интервалах с помощью специализированной системы [1] автоматически набивали на перфоленгу и затем вводили в ЭЦВМ «Минск-2».

Ставилась задача изучить статистические характеристики последовательного ряда R-R-интервалов ЭКГ и выделить признаки, наиболее коррелирующие с изучаемыми нарушениями сердечного ритма. Для оценки частоты сердечного ритма вычисляли средний интервал для оценки его вариабельности — среднеквадратичное отклонение σ ; коэффициент вариации K_v ; динамики частоты — текущие средние частоты на интервалах усреднения 2—5 с; плотности распределения интервалов — гистограмму (при построении нормированных гистограмм ширина класса выбиралась автоматически по закону $\Delta\tau = 0,07\bar{X}$); характера гистограммы — коэффициенты асимметрии A и эксцесса E и их предельных значений и их среднеквадратичные отклонения $\sigma(A)$ и $\sigma(E)$; вероятности появления очередного события после предыдущего — плотности восстановления; низкочастотных составляющих процесса — фазочастотный спектр; зависимости R-R-интервалов от порядка следования — коэффициенты корреляции до 20-го порядка с оценкой их значимости (вероятности случайной зависимости). Оценка достоверности различий проводилась с помощью непараметрических критериев статистики.

Последовательность ряда R-R-интервалов считали стационарной, если колебания текущей средней частоты относительно математическ

Статистические характеристики R-R-интервалов ЭКГ*

Значения статистических характеристик

в норме (группа 1)										при желудочковой экстрасистолии (группа 2)										при мерцании предсердий (группа 3)				
$\bar{X}_{мс}$	$\sigma_{мс}$	$K_B, \%$	A	$\sigma(A)$	E	$\sigma(E)$	$\bar{X}_{мс}$	$\sigma_{мс}$	$K_B, \%$	A	$\sigma(A)$	E	$\sigma(E)$	$\bar{X}_{мс}$	$\sigma_{мс}$	$K_B, \%$	A	$\sigma(A)$	E	$\sigma(E)$				
820	72	8,8	-6,8	0,2	59,0	0,5	928	163	17	-2,8	0,3	6,2	0,6	623	102	16	0,4	0,1	1,0	0,3				
566	17	3,0	0,6	0,2	9,1	0,4	845	157	18	-2,4	0,2	5,9	0,5	461	114	25	2,0	0,1	5,0	0,3				
716	26	3,7	0,5	0,2	0,2	0,5	957	102	11	-4,9	0,3	26,0	0,7	743	237	32	1,0	0,2	1,6	0,4				
813	83	10,0	-3,4	0,3	17,8	0,5	720	129	18	-2,3	0,2	7,9	0,4	662	137	21	0,8	0,2	1,5	0,4				
626	53	8,5	-4,4	0,2	57,9	0,4	712	102	14	-5,4	0,2	31,0	0,5	658	142	22	1,2	0,1	3,0	0,3				
808	59	7,4	-6,3	0,2	52,0	0,4	697	74	11	-4,3	0,2	19,6	0,4	908	172	19	0,6	0,2	0,0	0,4				
701	32	4,5	0,3	0,1	0,3	0,3	709	147	19	0,2	0,2	0,4	0,4	728	165	23	1,3	0,1	2,2	0,3				
793	52	6,6	0,4	0,2	0,3	0,4	921	132	14	-1,1	0,2	4,0	0,3	857	194	23	1,1	0,2	1,4	0,3				
845	17	2,0	0,4	0,2	0,3	0,4	833	126	15	-0,1	0,2	1,3	0,5	782	216	28	1,2	0,2	1,8	0,4				
885	35	4,0	-0,3	0,2	2,0	0,3	767	105	14	-3,0	0,2	9,7	0,4	952	270	28	1,2	0,2	0,5	0,4				
1035	64	6,0	0,0	0,2	2,8	0,4	775	186	24	0,2	0,2	0,8	0,2	1022	298	29	0,6	0,2	0,0	0,4				
1013	52	5,0	0,0	0,2	-0,9	0,4	894	142	16	0,0	0,2	5,2	0,3	786	229	29	0,7	0,2	0,5	0,3				
1110	90	8,0	-3,8	0,3	24,9	0,5	927	152	16	-1,2	0,2	27,0	0,5	755	252	34	1,4	0,2	3,6	0,4				
908	53	6,0	0,2	0,2	0,5	0,5	729	174	24	-2,2	0,3	4,2	0,6											
55	55	7,5	0,1	0,2	4,3	0,4																		
734	123	9,3	-0,6	0,2	0,6	0,5																		
879	80	10,0	-3,6	0,2	18,6	0,4																		
785	75	9,5	0,1	0,2	-0,9	0,6																		
801	78	9,7	-0,1	0,2	-1,2	0,5																		
838	89	11,0	0,9	0,2	0,3	0,4																		
780	84	11,7	2,1	0,2	11,6	0,3																		
865	109	12,6	0,7	0,2	7,4	0,4																		
723	76	10,5	-0,2	0,2	4,3	0,3																		
863	95	11,0	-0,3	0,2	-0,5	0,5																		
730	90	12,4	0,5	0,2	13,0	0,4																		

* При бигеминии $\bar{X} = 822$ мс; $\sigma = 362$ мс; $K_B = 44\%$; $A = 0,1$; $\sigma(A) = 0,1$; $E = -1,9$; $\sigma(E) = 0,3$.

Серийные коэффициенты корреляции R-R-интервалов ЭКГ*

Значения серийных коэффициентов корреляции

в норме						при желудочковой экстрасистолии					при мерцании предсердий					
R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
0,21**	0,12	-0,04	-0,05	-0,01		0,33	0,02	0,04	-0,08	-0,01		-0,13	0,01	-0,02	0,02	0,05
0,48	0,16	0,06	0,05	0,04		0,28	-0,09	0,04	0,05	0,00		0,13	0,06	0,00	0,03	-0,01
0,78	0,32	0,13	0,11	0,07		0,43	0,03	0,00	-0,02	-0,02		0,10	0,09	0,00	0,00	-0,01
0,44	0,06	0,02	0,02	0,03		0,30	0,02	-0,04	0,08	-0,02		0,14	-0,08	-0,08	-0,03	-0,03
0,34	0,05	0,02	-0,02	-0,04		0,28	0,01	-0,01	0,01	-0,01		-0,04	-0,02	0,10	0,01	0,01
0,42	0,03	-0,04	0,04	0,02		0,54	0,05	0,02	-0,01	-0,03		-0,04	0,00	0,07	-0,03	0,02
0,26	-0,01	-0,02	0,08	0,00		0,14	-0,10	0,09	-0,17	0,06		-0,05	0,02	-0,01	-0,01	0,01
0,48	0,04	0,06	-0,05	-0,01		0,01	0,15	0,05	0,04	0,03		0,08	0,02	0,04	0,00	-0,04
0,38	0,20	0,06	0,05	0,03		0,43	-0,04	0,00	-0,01	0,04		-0,09	-0,06	-0,07	-0,02	-0,01
0,57	0,24	0,17	0,02	0,02		0,61	0,10	0,02	0,01	0,00		-0,03	0,04	0,00	0,00	0,05
0,47	0,13	0,14	-0,07	0,07		0,44	-0,17	-0,13	-0,13	-0,12		0,11	-0,06	-0,01	0,04	-0,05
0,33	-0,08	-0,16	-0,04	0,01		0,29	0,01	0,00	0,00	0,00		0,04	0,02	-0,08	-0,02	-0,02
0,35	-0,11	0,22	0,02	0,00		-0,11	0,02	0,04	0,02	0,00		0,13	0,04	0,07	-0,01	-0,07
0,35	-0,03	-0,04	0,06	0,08		0,31	0,05	0,11	-0,11	-0,01						
0,07	-0,04	-0,03	0,08	-0,02												
0,25	-0,07	-0,06	-0,06	-0,02												
0,41	-0,03	-0,02	0,03	-0,01												
0,14	-0,04	-0,08	-0,04	0,01												
0,35	0,02	-0,04	-0,04	-0,01												
-0,17	-0,22	0,06	0,00	0,03												
0,25	-0,04	-0,06	-0,05	0,02												
0,33	-0,02	0,02	0,02	0,02												
0,14	0,06	0,01	-0,04	-0,05												
0,31	0,09	0,07	0,02	0,03												
-0,34	-0,01	0,00	-0,13	0,00												

* При бигеминии R₁ = -0,78; R₂ = -0,37; R₃ = -0,25; R₄ = -0,16; R₅ = -0,13.** Все подчеркнутые значения серийных коэффициентов корреляции являются значимыми с $\alpha \leq 0,05$.

казательной, квадратической, параболической и логарифмической функций регрессии. Оптимальные формы связи равнялись соответственно:

$$\sigma = 8,7 \cdot 10^{-2}\bar{X} - 6,5 \quad (r = 0,49) \text{ — для нормы,}$$

$$\sigma = 7,5 \cdot 10^{-2}\bar{X} + 73 \quad (r = 0,25) \text{ — для экстрасистолии,}$$

$$\sigma = 32,7 \cdot 10^{-2}\bar{X} - 56 \quad (r = 0,79) \text{ — для мерцания предсердий,}$$

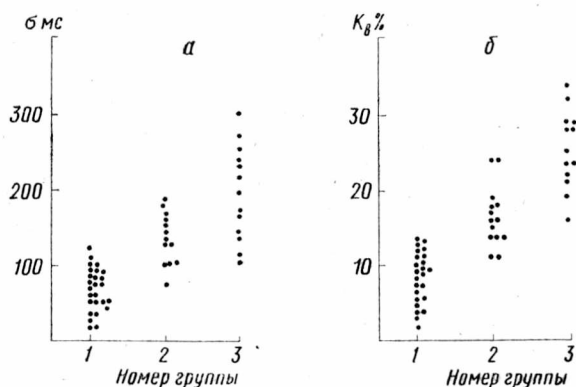


Рис. 1. Зависимость variability R-R-интервалов ЭКГ от вида нарушений сердечного ритма: а — по среднеквадратичному отклонению; б — по коэффициенту вариации

где r — коэффициент корреляции, позволяющий оценить степень близости аппроксимации к функциональной зависимости. Но величина информативности среднеквадратичного отклонения, определенная методом Кульбака, в группах 1—2 и 2—3 больше, чем информативность коэффициентов вариации (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4

Информативность параметров, определенная методом Кульбака

Наименование параметра	Значения параметров в группах		
	1—2	1—3	2—3
σ	4,54	1,35	3,65
$K_{\text{в}}$	3,38	2,85	3,50
R_1	—	2,97	1,67
A	—	1,49	2,68
E	—	—	2,05
\bar{X}	—	—	—

Гистограммы R-R-интервалов ЭКГ для каждого случая нарушения сердечного ритма оказались специфичными. Типичные из них показаны на рис. 2, где видно, что характер гистограмм в случае бигеминии бимодален, в случае желудочковой экстрасистолии отличается наличием определенного количества коротких и длинных интервалов на фоне модального распределения и в случае мерцания предсердий — значительным расширением гистограммы или появлением положительной

асимметрии. В норме гистограммы по своему характеру близки к распределению Гаусса. Оценка вида гистограмм с помощью коэффициентов A , $\sigma(A)$ и E , $\sigma(E)$ показывает, что определение близости распределения R-R-интервалов к нормальному с помощью этих приближенных критериев малоэффективно. Парное сравнение коэффициентов A и E в группах по критерию Вилькоксона-Манна-Уитни показывает, что различия коэффициентов E достоверны в группе 2—3 ($P \leq 0,005$), а коэффициентов A в группах 1—3 и 2—3 ($P \leq 0,001$). Для других групп различия несущественны. Визуально по форме гистограммы практически в 100% случаев можно было определить принадлежность к одной из 3-х групп (т. е. характер сердечного ритма).

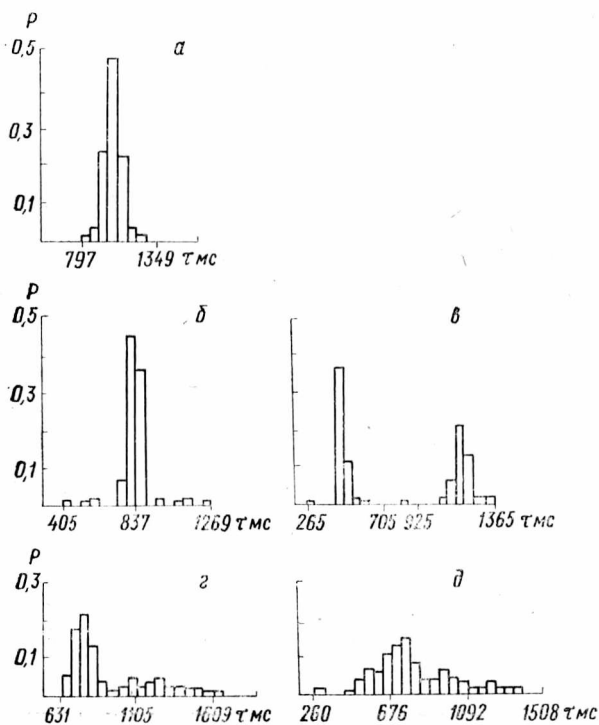


Рис. 2. Гистограммы R-R-интервалов ЭКГ:

а — в норме (количество R-R-интервалов $n = 216$);
б — при желудочковой экстрасистолии ($n = 216$); *в* —
при бигеминии ($n = 196$); *г*, *д* — при мерцании пред-
сердий ($n = 132$, $n = 224$)

Функция плотности восстановления, оцениваемая с помощью суммированной гистограммы, на интервалах около 4 с давала свертку гистограмм до 4-го порядка и имела специфическую форму для каждой записи, даже в пределах одной группы исследуемых людей. Функция фазо-частотной спектральной плотности в этом случае являлась зеркальным отражением функции плотности распределения R-R-интервалов ЭКГ и не несла никакой дополнительной информации. Спектрально-корреляционный анализ низкочастотных изменений мгновенной частоты, позволяющий выявлять наличие периодических составляющих в диапазоне частот 0.—0,2 Гц (интервал квантования 2 с, разрешающая спо-

способность спектрального анализа 0,005 Гц), также не дал никакой дополнительной информации.

Из рассмотренной группы сериальных коэффициентов корреляции различного порядка доступными для интерпретации следует пока признать коэффициенты корреляции 1-го порядка, поскольку среди них отмечалось наиболее частое появление значимых результатов (см. табл. 2). Парное сравнение коэффициентов корреляции 1-го порядка в группах по критерию Вилькоксона-Манна-Уитни показало, что различия достоверны между группами 1—3 ($P \leq 0,001$) и 2—3 ($P \leq 0,05$). Различия между группами 1—2 незначительны. В норме сериальные коэффициенты корреляции 1-го порядка практически всегда положительны и значимы, в то время как для случаев мерцания предсердий практически всегда незначимы. В других группах такой яркой зависимости не наблюдалось.

Результаты проведенных исследований подтвердили наличие определенной корреляции между рядом статистических показателей последовательности R-R-интервалов ЭКГ и характером сердечного ритма. Эти показатели могут быть использованы при диагностике нарушений сердечного ритма. В диагностический алгоритм могут быть включены такие параметры, как гистограмма, среднее квадратичное отклонение, коэффициенты вариации, асимметрии и эксцесса распределения, а также сериальные коэффициенты корреляции первого порядка. Среди всех этих признаков наиболее информативным следует признать гистограмму R-R-интервалов. Хотя оценка характера импульсации по виду гистограммы проводилась визуально, она практически в 100% случаев совпала с клиническим диагнозом. Величина информативности гистограммы не может быть определена методом Кульбака, применение же другого критерия для оценки информативности приведет к невозможности ее сравнения с информативностью других параметров. Считали, что величина информативности гистограммы наибольшая по сравнению с другими признаками и поэтому в классификационную табл. 5 она по-

ТАБЛИЦА 5

Классификационная таблица

Параметры в сравниваемых грунтах		
1—2	1—3	2—3
Гистограмма	Гистограмма	Гистограмма
K_b	K_b	K_b
σ	R_1	σ
—	A	A
—	σ	E
—	—	R_1

ставлена на первое место. Коэффициент вариации стоит на втором месте, а не на третьем для групп 1—2 и 2—3, так как между группами значений K_b перекрытия зон значительно меньше, чем у σ , в то время как различия в величинах информативности этих признаков незначительны. Остальные признаки в табл. 5 расположены строго в соответствии с величиной их информативности. Оценка вида гистограмм с помощью коэффициента A информативна только для групп 1—3, что недостаточно для надежной диагностики. С целью повышения достоверности автоматической диагностики необходим поиск дополнительных критериев оценки вида гистограмм. Из полученных информативных

признаков только сериальный коэффициент корреляции 1-го порядка не получает формального отражения в гистограмме и несет самостоятельное значение в повышении достоверности диагностики. Использование для оценки только двух признаков — сериального коэффициента корреляции первого порядка и коэффициента вариации — значительно не повышает достоверности диагностики (рис. 3). Также следует отметить, что при составлении диагностического алгоритма можно не принимать в расчет среднеквадратичное отклонение R-R-интервалов, поскольку вся информация, заложенная в нем, входит и в коэффициент вариации.

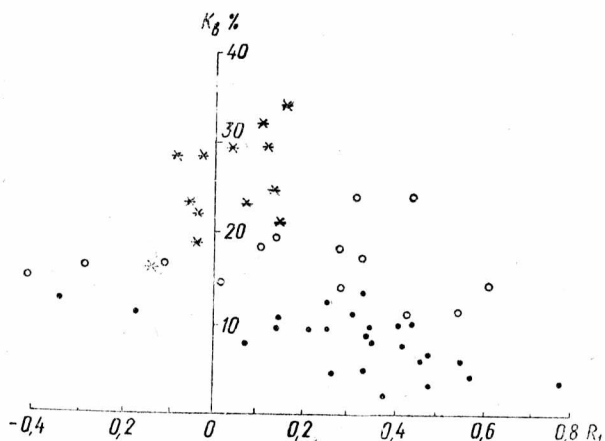


Рис. 3. Зависимость variability R-R-интервалов ЭКГ от сериальных коэффициентов корреляции 1-го порядка:

точками обозначена зависимость в норме; кружочками — при желудочковой экстрасистолии; крестиками — при мерцании предсердий

На основании вышеизложенного можно отметить, что на этапе создания специализированного вычислительного устройства для оценки нарушений сердечного ритма наиболее перспективным параметром для включения в алгоритм прибора должна быть гистограмма R-R-интервалов ЭКГ. Усложнение алгоритма прибора путем введения блоков вычисления K_v , A , E и сериальных коэффициентов корреляции 1-го порядка значительно усложнит прибор, но не принесет ощутимого выигрыша в повышении достоверности диагностики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков С. П. Некоторые вопросы автоматизации обработки ЭМГ человека при игольчатом отведении. «Новости медицинского приборостроения». М., ВНИИМП, 1973, вып. 2, с. 115.
2. Воскресенский А. Д., Вентцель М. Д. Исследование регуляции функций сердечно-сосудистой системы посредством автоматического анализа нескольких параметров в рядах последовательных сердечных циклов. В сб.: «Статистическая электрофизиология», Паланга, 1968, ч. I, с. 48.
3. Голышев Е. И. [и др.]. Практические аспекты применения кардиомонитора «Ритм-5» с автоматическим анализом нарушений сердечного ритма. В сб.: «Новые направления в электрокардиологии», Ереван, 1973, с. 62.
4. Гублер Е. В., Генкин А. А. Непараметрические критерии статистики в медико-биологических исследованиях. Л., «Медицина», 1973.
5. Фирсова Г. С., Тартаковский М. Б. О некоторых принципах выбора признаков для автоматического распознавания расстройств сердечного ритма. В сб.: «Биофизика мембран», Паланга, 1969, с. 345.

6. Шуберт Э., Бодман Х., Эккольд К. Изменчивость ритма сердца по гистограммам интервалов. В сб.: «Новые направления в электрокардиологии», Ереван, 1973, с. 42.

7. Wartak I. Computers in Electrocardiography. Illinois, 1970.

SUMMARY

Some questions relevant to studying the statistic characteristics of the ECC R-R intervals, normal and at some cardiac rhythm disorders were looked through. Multiparametric information processing was employed, with the validity estimated by means of nonparametric statistics' criteria. A set of informative parameters is offered to design special computing device.

**Б. С. Михлин,
С. П. Булгаков,
М. И. Куликов**

УДК 681.335.2 : 616-073.7

Биполярный аналого-цифровой преобразователь последовательного счета на интегральных схемах

В последние годы в медицинской практике все большее распространение находят анализаторы биоэлектрических процессов. Обработка информации в таких анализаторах ведется в цифровой форме, что позволяет реализовать высокие точности вычислений. В этих случаях необходимо иметь средства перевода аналоговой информации в цифровой вид. Этой цели служат аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Существует несколько типов АЦП, отличающихся методами преобразования аналоговых сигналов в цифровые [1]. Эти АЦП имеют различное быстродействие, точность преобразования, сложность построения логической части и др. К сожалению, готовые АЦП с высоким быстродействием в микроинтегральном исполнении труднодоступны. Использование же дорогостоящих прецизионных блоков АЦП, имеющих большие габариты, крайне неэффективно.

Целью работы было создание АЦП в интегральном исполнении, пригодного для обработки различных видов биоэлектрической информации, включая ЭМГ- и ЭЭГ-сигналы, на интервалах обработки до 1 мс с погрешностью не более 2%.

Функциональная схема разработанного АЦП представлена на рис. 1. АЦП позволяет обрабатывать биполярные сигналы амплитудой ± 1 В пик/турик в диапазоне частот 0,1—1000 Гц. Входное сопротивление АЦП — не менее 1,0 МОм. Перегрузка АЦП по входу индицируется сигналами переполнения по «+» или «-». Точность установки нулевой изолинии индицируется сигналом «0».

АЦП работает следующим образом. Преобразуемый сигнал поступает через клемму «Вход» на аттенюатор 2, его установкой добиваются максимального использования динамического диапазона АЦП — еще не загораются сигналы переполнения. Далее сигнал через согласующее