УДК 004.5

ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ ПРИ ФОТОСТИМУЛЯЦИИ

© 2021 г. Я.А. Туровский^{*, **}, С.В. Борзунов^{*}, В.Ю. Алексеев^{*}, М.А. Карпова^{*}

*Воронежский государственный университет, 394018, Воронеж, Университетская пл., 1 **Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 117997, Профсоюзная ул., 65

> *E-mail: Yaroslav_turovsk@mail.ru* Поступила в редакцию 11.04.2020 г. После доработки 08.02.2021 г. Принята к публикации 24.02.2021 г.

Предложен метод оценки частотной модуляции электроэнцефалограммы на основе Фурье-фильтрации исходного сигнала в узких частотных диапазонах, с последующим расчетом периодов пикпик как для максимумов, так и для минимумов восстановленного сигнала. Полученные последовательности обрабатывались с использованием преобразования Фурье. В качестве объектов исследования были использованы электроэнцефалограммы здоровых добровольцев, полученные в ходе фотостимуляции. В целом диапазон электроэнцефалограмм в 7–9 Гц продемонстрировал для затылочных отведений более выраженный феномен частотной модуляции, в отличие от диапазона 13– 15 Гц. Выявлено практически полное отсутствие различий для относительных к общей мощности спектральных показателей влияний, модулирующих электроэнцефалограмму. Выявлены два типа частотной модуляции электроэнцефалограмм в исследуемых частотных диапазонах – первый не связан с частотами и характеризуется либо высоким, либо низким уровнем воздействия, второй имеет связь характера модуляции с «несущей» частотой сигнала.

Ключевые слова: ЭЭГ, частотная модуляция, вызванные потенциалы. **DOI:** 10.31857/S0006302921030194

Анализ сигналов, порождаемых биологическим системами, с целью последующей расшифровки их работы является одной из ключевых как фундаментальных, так и прикладных задач. Очевидно, что биологические системы представляют собой сложно организованный набор осцилляторов, функционирующих на различной частоте и связанных друг с другом в общем случае нелинейными зависимостями. Одним из примеров сигналов, порождаемых подобными системами, является электроэнцефалограмма (ЭЭГ). Огромный массив методов анализа, разработанных для ее изучения, к настоящему времени можно, с известной долей условности, разделить на две части: методы, анализирующие амплитудно-частотные характеристики сигналов, и методы, анализирующие взаимосвязь сигналов ЭЭГ. В первом случае достаточно распространенным подходом в оценке взаимодействия различных контуров управления и регуляции является анализ амплитуд ритмов ЭЭГ [1, 2] и оценка амплитудной модуляции [3]. Однако можно предполо-

Сокращения: ЭЭГ — электроэнцефалограмма, СПМ — спектральная плотность мощности, ΦC — фотостимуляция.

жить, что наряду с амплитудной модуляцией информацию несет и частотная модуляция ЭЭГ, подходы к анализу которой встречаются существенно реже. Таким образом, актуальным представляется разработка методов оценки частотной модуляции ЭЭГ, обеспечивающих физиологически значимую интерпретацию результатов цифровой обработки сигнала. Одним из таких методов является, например, метод расчета цепочек локальных максимумов квадратов коэффициентов вейвлет-преобразования [4]. Данный подход основан на анализе значимых по амплитуде компонентов ЭЭГ в частотно-временной области. В то же время следует, учитывая непрерывность ЭЭГ-спектра, рассмотреть возможность выделения низкоамплитудных компонентов ЭЭГ и оценку их частотной модуляции.

Целью работы была оценка частотной модуляции ЭЭГ на примере проб с фотостимуляцией.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 14 добровольцев в возрасте от 19 до 23 лет (10 юношей и 4 девушки). Испытуемые не имели неврологической и психиатрической патологии, не принима-



Рис. 1. (а) — Результаты Фурье-фильтрации ЭЭГ (отведение О1, частота дискретизации 1 кГц) в диапазоне 8–12 Гц при фотостимуляции. Цифрами 1, ..., 4 обозначены интервалы «пик–пик» для локальных максимумов; (б) — вариабельность периодов «пик– пик» для рис. 1а.

ли лекарств, влияющих на координацию движений и скорость принятия решения. Фотостимуляцию (ФС) на частотах 1, 8, 14 Гц осуществляли четырьмя диодами белого цвета, расположенными на расстоянии 1 м от глаз испытуемого. Ее длительность составляла 3 мин, перерыв между сеансами фотостимуляции — не менее 5 мин. Данные фиксировали электроэнцефалографом «Нейрон-Спектр 4 ВП» (ООО «Нейрософт», Россия) в отведениях О1, О2, Оz, Р3, Р4, Рz с частотой дискретизации 1 кГц, включенным режекторным фильтром и отключенным фильтром высоких частот.

Для оценки частотной модуляции использовали анализ кривой «пик—пик» для отфильтрованной ЭЭГ. Фильтрацию с помощью прямого и обратного преобразования Фурье [5] проводили в частотных диапазонах 7—9, 9—11 и 13—15 Гц. Основой предложенного подхода является известная из методологии анализа вариабельности сердечного ритма методика расчета во временном пространстве отрезков «пик—пик» для отфильтрованного в заданном частотном диапазоне сигнала (рис. 1).

Методологически данный подход похож на ранние попытки анализа ЭЭГ: велся подсчет частотных пиков на единицу времени записи. Однако в этом случае учитываются все частоты ЭЭГ, что, очевидно, существенно искажает картину, поскольку пики, соответствующие высокочастотным колебаниям, будут превалировать по встречаемости над пиками низкочастотных колебаний. Для избежания этой ситуации необходимо фильтровать сигналы в достаточно узких частотных диапазонах и соответственно учитывать эту особенность при содержательной интерпретации.

Очевидно, что параметры фильтра могут оказать влияние на характер локальных экстремумов (рис. 2 и 3). Так, например, из рис. 2 следует, что только на относительно небольших отрезках времени в исследуемом частотном диапазоне (ограничен параллельными линиями от масштаба вейвлет-преобразования 91 до масштаба 111) присутствуют выраженные частотные компоненты сигнала — цепочки локальных максимумов локальных спектров. В остальных максимумов локальных спектров. В остальных случаях полученный в этом частотном диапазоне сигнал представляет собой выделенный в отдельной частотно-временной области фрагмент исследуемого сигнала. Отметим, что в общем случае последова-



Рис. 2. Цепочки локальных максимумов и выделенный частотный диапазон для обратного преобразования Фурье. Частота фотостимуляции 14 Гц, отведение O1.



Рис. 3. Оценка последовательности «пик–пик» (максимумы) для сигнала ЭЭГ (отведение O1, частота фотостимуляции 14 Гц), отфильтрованного с использованием преобразования Фурье в частотном диапазоне 10–11 Гц.

тельности «пик—пик» для локальных максимумов и локальных минимумов не являются тождественными.

На рис. 3, представляющем собой результат оценки последовательности «пик–пик» для результата Фурье-фильтрации в диапазоне 9–11 Гц, обращает на себя внимание наличие «выбросов», отражающих как увеличение периода «пик–пик», так и его уменьшение. Для понимания механизма образования данных феноменов достаточно взглянуть на рис. 1. Из него следует, что второй период «пик–пик» оказался существенно длиннее предыдущего и последующего, что вызвано сдвигом фазы исследуемого сигнала. Таким образом, выявленные пики можно рассматривать как изменение фазы модуляции ЭЭГ в заданном частотном диапазоне.

Следует отметить, что изложенный подход является дополнением подхода, основанного на анализе «цепочек локальных максимумов». Последний основан на выделении наиболее выраженных частотных компонент сигнала, в то время как расчет периодов сигнала в узких частотных диапазонах позволяет, с учетом необходимой фильтрации, анализировать относительно незначительные по амплитуде колебания, качественное обнаружение которых на фоне высокоамплитудных компонентов не всегда возможно.

Получив искомые последовательности, можно, очевидно, использовать парадигмы анализа вариабельности сердечного ритма. Иными словами, в данном случае можно использовать как статистические подходы, так и спектральные, основанные на преобразовании Фурье [6] или вейвлет-преобразовании [7]. В исследовании анализировали два частотных диапазона модуляции – 1-3 Гц и 3-5 Гц, которые в дальнейшем будем обозначать как СПМ1 и СПМ2. При этом оценивали как абсолютные значения спектральной плотности мощности (СПМ), так и их значения (в процентах) по отношению к СПМ всего спектра. В статистическом анализе использовали методы дескриптивной статистики, критерии Крускала–Уоллеса, Манна–Уитни, Фридмана для парных случаев [8, 9], при этом параметр α принимался равным 5%. Для анализа категориальных переменных использовали точный критерий Фишера. Для статистического изучения связи между явлениями использовали непараметрический метод – коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Учитывался эффект множественных сравнений. Для кластерного анализа использовали метод *К*-средних.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно полученным результатам, различия в зависимости от частот фотостимуляции по-разному связаны с последовательностями для локальных максимумов и для последовательности локальных минимумов, что подтверждает подход об информационной ценности каждой из этих временных серий частотной модуляции. Ожидаемо, что в затылочных отведениях выявлены различные изменения модулирующих воздействий в зависимости от частоты фотостимуляции (табл. 1). Наименьшие значения в обоих исследуемых диапазонах СПМ были получены для фотостимуляции 8 Гц при сравнении абсолютных значений, а максимальные соответствовали 1 Гц. В то же время в процентных величинах от общей мощности спектра различий выявлено не было, что свидетельствует об общем снижении модулирующих влияний в данном исследуемом частотном диапазоне. Теменные отведения продемонстрировали наибольшие относительные значения в диапазоне модуляции от 3 до 5 Гц для частоты стимуляции 14 Гц. Очевидно, что сам факт ФС обеспечивает известный эффект навязывания ритма, что, очевидно, и приводит к подавлению эндогенных модулирующих воздействий. При этом относительно низкая частота ФС в 1 Гц обеспечивает возможность восстановления этих влияний в межстимульный интервал. Действительно, согласно работе [10] длительность зри-

ТУРОВСКИЙ и др.

	Частоты ФС	Отведе- ния	СПМ1, мс ² ***	СПМ2, мс ² **	Доля СПМ1, %	Доля СПМ2, % #
Максимумы	1 Гц	3	15174628 ± 1054802	6952903 ± 627845	30.8 ± 0.3	13.8 ± 0.4
		Т	13307450 ± 302978	5622702 ± 256878	30.3 ± 0.2	12.6 ± 0.4
	14 Гц	3	14531435 ± 564121	6807009 ± 348066	31.0 ± 0.3	14.4 ± 0.4
		Т	14317992 ± 554601	6408949 ± 332299	30.6 ± 0.2	13.5 ± 0.4
	8 Гц	3	13662689 ± 736953	5895261 ± 453282	30.6 ± 0.3	12.9 ± 0.4
		Т	13999356 ± 740497	6174009 ± 441059	30.7 ± 0.3	13.3 ± 0.4
Минимумы	1 Гц	3	15073799 ± 1010941	6728760 ± 533460	30.9 ± 0.3	13.6 ± 0.3
		Т	13426671 ± 317632	5855746 ± 264322	30.2 ± 0.2	13.0 ± 0.3
	14 Гц	3	14503626 ± 566858	6824103 ± 352276	30.9 ± 0.3	14.4 ± 0.4
		Т	14325370 ± 544686	6388815 ± 343779	30.6 ± 0.2	13.4 ± 0.4
	8 Гц	3	13650197 ± 718358	6000650 ± 409554	30.5 ± 0.3	13.2 ± 0.3
		Т	14079751 ± 754800	6259775 ± 427153	30.8 ± 0.3	13.5 ± 0.4

Таблица 1. Значения СПМ и доля СПМ от общей мощности спектра

Примечание. Фильтрация в диапазоне 10–11 Гц. Различия: ** – для затылочных отведений при сравнении по разным частотам для максимумов, p < 0.01, *** – p < 0.001; # – для теменных отведений при сравнении по разным частотам для максимумов, p < 0.01; 3 – затылочные отведения, T – теменные.

тельного вызванного потенциала составляет 150— 300 мс. Следовательно, остальные 700 мс межстимульного интервала могут обеспечивать восстановление эндогенной модуляции. Можно предположить, что при более частой ФС межстимульный период для такого восстановления будет недостаточен.

Рассмотрим результаты фильтрации сигналов в диапазонах, совпадающих с частотами фотостимуляции, находящимися в частотной области α-ритма или близкой к нему. Для диапазона 13-15 Гц различия для разных режимов фотостимуляции и для затылочных и для теменных отведений характеризовались наиболее выраженными модуляционными воздействиями в частотном диапазоне 1-3 Гц (табл. 2). Это подтверждает изложенную выше гипотезу о быстром восстановлении эндогенной частотной модуляции ЭЭГ. Следует отметить, что, в отличие от фильтрации ЭЭГ в диапазоне, отличном от частот ΦC , картина была иной: с одной стороны, наиболее выраженные частотно-модуляционные воздействия наблюдались для частоты ФС в 8 Гц, с другой – более высокочастотный диапазон модуляции не продемонстрировал значимых различий ни для одной из исследуемых частот.

При оценке вариабельности периодов «пикпик» для сигнала, отфильтрованного в диапазоне 7–9 Гц, были получены достоверные различия для обоих исследуемых частотных диапазонов модуляции. В этом случае наиболее выраженные модуляционный воздействия наблюдали для частоты ΦC в 14 Гц. В целом диапазон ЭЭГ в 7–9 Гц продемонстрировал для затылочных отведений более выраженный феномен частотной модуляции, в отличие от диапазона 13–15 Гц, что, вероятно, связано с его нахождением в районе верхней границы α -ритма. Другое объяснение данного наблюдения также связано со временем, необходимым для восстановления эндогенной частотной модуляции после фотостимуляции. В этом случае более высокочастотные ΦC дают меньшее время для этого восстановления.

Поскольку в общем случае частотная модуляция в виде последовательностей периода «пикпик» различается при анализе максимумов и минимумов отфильтрованного сигнала, в табл. 3 представлены результаты анализа последовательностей, построенных на основе оценки периода минимумов. Обращает на себя внимание тот факт, что, в отличие от вариабельности периодов максимумов мгновенных амплитуд, в случае минимумов различия отсутствуют для теменных электродов, вне зависимости от того, в каком частотном диапазоне осуществлялась фильтрация. Также не выявлены статистически значимые различия в эффектах модуляции для сигнала, отфильтрованного в диапазоне 7-9 Гц. Для сигнала, отфильтрованного в диапазоне 13–15 Гц, картина в целом повторяла полученную для последовательности максимумов мгновенных амплитуд. Наиболее значимая частотная модуляция была выявлена для фотостимуляции в 8 Гц для последовательностей, построенных на макси-

ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ

Фильтрация в диапазоне 13–15 Гц								
Отведения	Частоты ФС	СПМ1, мс ² ** #	СПМ2, мс ²	Доля СПМ1, %	Доля СПМ2, %			
3	1 Гц	28873401 ± 925346	13023808 ± 644770.3	34.0 ± 0.7	15.0 ± 0.3			
	14 Гц	25321517 ± 1199166	11656437 ± 645991.6	33.4 ± 0.3	15.2 ± 0.3			
	8 Гц	31406175м1383432	14200736 ± 776664.3	33.7 ± 0.2	15.1 ± 0.3			
Т	1 Гц	29519212 ± 580094	13354085 ± 376103.3	33.8 ± 0.2	15.2 ± 0.2			
	14 Гц	28641901 ± 1280082	13464547 ± 719586.1	33.7 ± 0.2	15.7 ± 0.3			
	8 Гц	32352703 ± 1459955	15178001 ± 834247.1	33.9 ± 0.3	15.8 ± 0.4			
Фильтрация в диапазоне 7–9 Гц								
Отведения	Частоты ФС	СПМ1, мс ² **	СПМ2, мс ² **	Доля СПМ1, %	Доля СПМ2, % *			
3	1 Гц	79172037 ± 3198985	38244204 ± 2062255	38.8 ± 0.4	18.4 ± 0.3			
	14 Гц	79438523 ± 2492632	39036726 ± 1609176	37.7 ± 0.4	18.4 ± 0.3			
	8 Гц	73423324 ± 3212182	33544958 ± 1883178	38.5 ± 0.3	17.3 ± 0.2			
Т	1 Гц	77821508 ± 1792666	37107762 ± 1287237	38.1 ± 0.3	18.0 ± 0.3			
	<u>14 Ги</u>	80230827 ± 2513995	39475647 ± 1607629	37.8 ± 0.3	18.5 ± 0.3			

Таблица 2. Расчет модуляции по максимумам отфильтрованных сигналов ЭЭГ

Примечание. Различия: * -p < 0.05 для затылочных отведений при сравнении по разным частотам для максимумов,** -p < 0.01 для затылочных отведений при сравнении по разным частотам для максимумов,; # -p < 0.01 для теменных отведений при сравнении по разным частотам для максимумов,; # -p < 0.01 для теменных отведений при сравнении по разным частотам для максимумов, Т - теменные.

мумах отфильтрованных сигналов. При этом данная зависимость наблюдалась в обоих исследованных частотных диапазонах модуляции.

Обращает на себя внимание практически полное отсутствие различий при сравнении не абсолютных, а относительных (по сравнению с общей мощностью спектра) показателей. Это может служить маркером того, что изменения в спектральных характеристиках частотной модуляции ЭЭГсигнала не локализованы в каком-то узком диапазоне, а охватывают значительные диапазоны

Фильтрация в диапазоне 13–15 Гц								
Отведения	Частоты ФС	СПМ1, мс ² **	СПМ2, мс ² *	Доля СПМ1, %	Доля СПМ2, %			
3	1 Гц	28985860 ± 908163	13242805 ± 639664.0	34.0 ± 0.7	15.2 ± 0.4			
	14 Гц	25331539 ± 1167444	11475922 ± 548032.0	33.5 ± 0.3	15.1 ± 0.3			
	8 Гц	31450558 ± 1411787	14162871 ± 794502.7	33.8 ± 0.3	15.1 ± 0.3			
Т	1 Гц	29633339 ± 595901	13743830 ± 433834.1	33.8 ± 0.2	15.6 ± 0.3			
	14 Гц	28576864 ± 1272135	13315756 ± 717138.0	33.7 ± 0.2	15.6 ± 0.3			
	8 Гц	32245880 ± 1462047	15060723 ± 790362.9	33.9 ± 0.3	15.7 ± 0.3			
Фильтрация в диапазоне 7–9 Гц								
Отведения	Частоты ФС	СПМ1, мс ²	СПМ2, мс ²	Доля СПМ1, %	Доля СПМ2, %			
3	1 Гц	79754278 ± 3195667	39502493 ± 1967363	38.7 ± 0.4	19.6 ± 0.8			
	14 Гц	79081770 ± 2524279	37698557 ± 1575707	37.8 ± 0.4	17.9 ± 0.3			
	8 Гц	73853033 ± 3149986	34196724 ± 1761056	38.4 ± 0.4	17.6 ± 0.3			
Т	1 Гц	77916559 ± 1736560	37591372 ± 1221652	38.1 ± 0.2	$18. \pm 0.3$			
	14 Гц	80385029 ± 2586603	39080684 ± 1692198	37.9 ± 0.3	18.3 ± 0.3			
	8 Гц	79271414 ± 2818233	37419431 ± 1802944	38.3 ± 0.4	17.8 ± 0.2			

Таблица 3. Расчет модуляции по минимумам отфильтрованных сигналов ЭЭГ

Примечание. Различия: * – p < 0.05 для затылочных отведений при сравнении по разным частотам для максимумов, ** – p < 0.01 для затылочных отведений при сравнении по разным частотам для максимумов; 3 – затылочные отведения, T – теменные.



Рис. 4. Результаты кластерного анализа относительных значений СПМ в диапазоне 1–3 Гц.

частот, выходя за пределы выбранных в исследовании диапазонов.

Рассмотрим возможные групповые особенности выявленных изменений (рис. 4). В качестве объекта кластеризации были выбраны относительные показатели СПМ как для затылочных, так и для теменных отведений, построенных основе результатов Фурье-фильтрации в диапазонах 7-9 Гц и 13-15 Гц. Использовали все варианты фотостимуляции (таким образом, для каждого испытуемого могло быть получено 18 наблюдений). Были исключены наблюдения, характеризующиеся так называемыми «выбросами» - высокоамплитудными отклонениями от распределения выборки. Кластеры № 1 (103 наблюдения) и № 2 (31 наблюдение) демонстрируют схожую динамику, различаясь только процентной долей значений СПМ от общей мощности спектра. Наиболее интересную картину частотной модуляции демонстрирует кластер № 3 (78 наблюдений). Для него характерны наиболее выраженные модуляционные воздействия для частот в диапазоне 7-9 Гц, но при этом минимальные для частот, отфильтрованных в диапазоне 13-15 Гц. Для значений СПМ, рассчитанной на основе последовательности минимумов и максимумов для диапазона 7–9 Гц, средние значения кластера № 1 отличались от таковых для кластеров № 2 и № 3 (*p* << 0.001). Для частот 13–15 Гц, наоборот, значения кластера № 2 отличались от значений кластеров № 1 и № 3. Таким образом, можно говорить о выявлении двух типов частотной модуляции ЭЭГ в исследуемых частотных диапазонах - первый не связан с частотами и характеризуется либо высоким, либо низким уровнем воздействия, второй имеет связь характера модуляции с «несущей» частотой сигнала. Можно предположить, что данная связь является следствием индивидуально-типологических различий, связанных с восстановлением эндогенной частотной модуляции, нарушенной после каждой вспышки света, соответствующей периодической фотостимуляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод оценки частотной модуляции ЭЭГ на основе Фурье-фильтрации исходного сигнала в узких частотных диапазонах, с последующим расчетом периодов «пик-пик» как для максимумов, так и для минимумов восстановленного сигнала. Полученные последовательности обрабатывались с использованием преобразования Фурье. В качестве объектов исследования были использованы ЭЭГ здоровых добровольцев, полученные в ходе фотостимуляции. В целом диапазон ЭЭГ в 7–9 Гц продемонстрировал для затылочных отведений более выраженный феномен частотной модуляции, в отличие от диапазона 13-15 Гц, что, вероятно, связано с его нахождением в районе верхней границы α-ритма. Возможное альтернативное объяснение – больший период времени между вспышками света для низкочастотной ФС в большей степени способствует восстановлению эндогенных модулирующих воздействий. Выявлено практически полное отсутствие различий при сравнении не абсолютных, а относительных по сравнению с общей мощностью спектра показателей. Это может служить маркером того, что изменения в спектральных характеристиках частотной модуляции ЭЭГ сигнала не локализованы в каком-то узком диапазоне, а охватывают значительные диапазоны частот, выходя за пределы выбранных в исследовании диапазонов. Выявлены два типа частотной модуляции ЭЭГ в исследуемых частотных диапазонах. Первый не связан с частотами и характеризуется либо высоким, либо низким уровнем воздействия, второй имеет связь характера модуляции с «несущей» частотой сигнала.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-29-01156мк).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все процедуры, выполненные в исследовании с участием людей, соответствовали этическим стандартам Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующим изменениям. От всех участников предварительно было получено информированное добровольное согласие на участие в исследовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- В. Н. Думенко, М. К. Козлов и Е. А. Черемушкин, Журн. высш. нерв. деятельности им. И.П. Павлова 64 (4), 401 (2014).
- 2. С. И. Новикова, Е. В. Малаховская, Н. П. Пушина и др., Физиология человека **35** (4), 20 (2009).
- А. Б. Трембач, С. Р. Гутман, А. Л. Корепанов и О. В. Пирожков, Биофизика 35 (5), 850 (1990).

- 4. Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин и А. Г. Семенов, Биофизика **59** (1), 185 (2014).
- 5. К. В. Титов, Инж. вестн., № 6, 32 (2017).
- 6. И. В. Таротин и Г. А. Иваницкий, Журн. высш. нерв. деятельности им. И.П. Павлова **64** (6), 615 (2014).
- 7. Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин и А. Г. Семёнов, Цифровая обработка сигналов, № 2, 20 (2013).
- 8. С. Гланц, *Медико-биологическая статистика* (Практика, М., 1998).
- Р. Рунион, Справочник по непараметрической статистике. Современный подход (Финансы и статистика, М., 1982).
- В. В. Гнездицкий, Вызванные потенциалы мозга в клинической практике (МЕДпресс информ., М., 2003).

Frequency Modulation of Electroencephalogram under Photostimulation

Ya.A. Turovsky*, **, S.V. Borzunov*, V.Yu. Alekseev*, and M.A. Karpova*

*Voronezh State University, Universitetskaya pl. 1, Voronezh, 394018 Russia

**V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya ul. 65, Moscow, 117997 Russia

In this paper, we propose a method for estimating the frequency modulation of EEG based on Fourier filtering of the initial signal on a narrow frequency band, followed by calculation of the time taken to reach both maximum and minimum peak values of the reconstructed signal (peak-to-peak periods). The resulting sequences were processed using the Fourier transform. EEGs recorded from healthy volunteers during photostimulation were used as objects of study. Overall, EEG responses with a frequency range of 7 to 9 Hz demonstrated more pronounced phenomenon of frequency modulation for occipital leads than those with the frequency range of 13 to 15 Hz. There were almost no differences in power spectral indices that modulate EEG. Two types of EEG frequency modulation were revealed in the studied frequency ranges – the first is not related to frequencies and is characterized by either a high or low level of exposure, the second has a connection between the nature of the modulation and the "carrier" frequency of the signal.

Keywords: EEG, frequency modulation, evoked potentials