

## Моделирование полосно-пропускающего фильтра на основе топологии

### Саллена-Ки

*В.С. Демиденко*

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М. И. Платова, Новочеркасск*

**Аннотация:** В данной статье рассмотрено моделирование полосно-пропускающего фильтра Баттерворта 4-го порядка, с топологией Саллена-Ки, составленного из 2-х каскадов с полосой пропускания от 31,5 Гц до 8,5 кГц, предназначенного для работы в составе цифрового измерителя уровня шума. Моделирование производилось в современном пакете автоматизированного проектирования Filter Design Tool от Texas Instruments. Представлены результаты моделирования, сделано заключение о соответствии параметров смоделированного фильтра расчетным. Фильтр обладает удовлетворительной добротностью, отклонением по амплитуде в полосе пропускания, является достаточно простым и экономически приемлемым с точки зрения его реализации.

**Ключевые слова:** измеритель шума, фильтр полосно-пропускающий, фильтр Баттерворта, топология Саллена-Ки, моделирование, САПР.

Фильтр является неотъемлемой частью цифрового измерителя уровня шума, принцип работы которого заключается в преобразовании колебаний мембраны микрофона от прироста звукового давления в воздухе, в электрический сигнал, проходящий через усиление и фильтрацию и поступающий на вход вольтметра, после чего информация с него поступает на индикатор [1 – 3]. Иными словами, шумомер представляет собой микрофон с подключённым к нему измерителем уровня напряжения и системы, которая, принимая эти показатели, обрабатывает их и выдает результат, отградуированный в децибелах [4, 5].

Для нашего цифрового измерителя уровня шума необходим полосно-пропускающий фильтр с полосой пропускания от 31,5 Гц до 8,5 кГц. По типу передаточной функции выберем фильтр Баттерворта 4-го порядка, т.к. он имеет стабильное значение усиления в области пропускания частот [6 – 8]. Это существенно для разрабатываемого в проекте устройства, т.к. для более точных измерений необходимо максимально эффективно отсеивать лишние частоты и при этом минимально воздействовать на амплитуду нужных частот.

---

Для его реализации используем схему 2-х последовательно соединённых фильтров Баттерворта 2-го порядка. Топологию выберем Саллена-Ки, т.к. для её реализации требуется всего 1 ОУ на каскад.

Рассмотрим следующую схему высокодобротного полосно-пропускающего активного фильтра (рисунок 1) [9, 10].

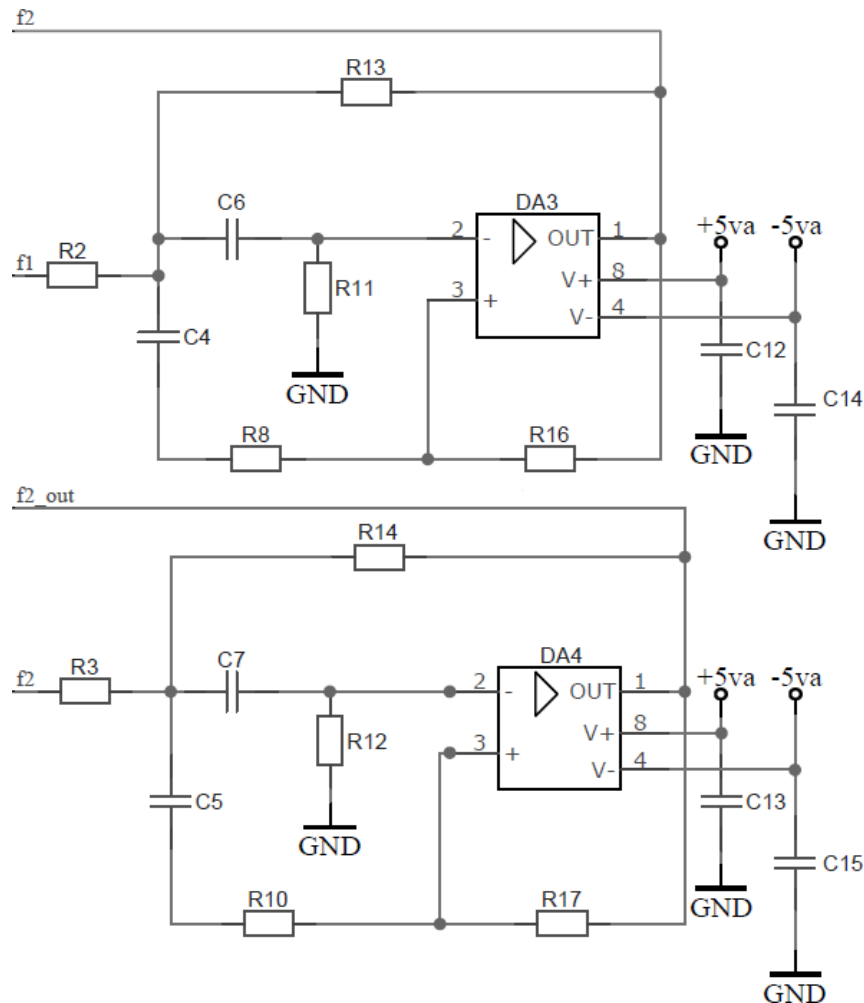


Рисунок 1. Принципиальная схема полосно-пропускающего фильтра на основе топологии Саллена-Ки

Рассчитаем центральную частоту  $\omega_0$  исходя из известных характеристик фильтра (верхней  $\omega_B$  и нижней  $\omega_H$  частот полосы пропускания) по следующей формуле:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_H \cdot \omega_B} = \sqrt{8500 \cdot 31,5} = 517,45 \text{ Гц.}$$

Ширина полосы пропускания фильтра:

$$WB = 8500 - 31,5 = 8468,5 \text{ Гц.}$$

Воспользуемся симулятором Filter Design Tool от Texas Instruments и смоделируем фильтр и известными нам характеристиками.

Работу в Filter Design Tool можно разделить на 3 ступени.

1. Выбор характеристик фильтра. Сначала пользователь выбирает нужный тип фильтра. Затем ему предоставляется функционал, позволяющий выбрать параметры полосы пропускания и параметры полосы подавления.

2. Выбор топологии. Симулятор предлагает выбрать из многопетлевой обратной связи или же фильтра Саллена-Ки. Также предоставляется на выбор множество подходящих для конкретной схемы операционных усилителей. По умолчанию выбран самый оптимальный по характеристикам вариант.

3. Проектирование и анализ. На данном этапе пользователь выбирает нужное напряжение питания операционного усилителя и его полосу пропускания, а также тип резисторов, конденсаторов. Здесь же выбирается тип анализа чувствительности.

Выберем тип фильтра. В нашем случае это будет полосно-пропускающий фильтр (рисунок 2). После перейдем на следующий этап.

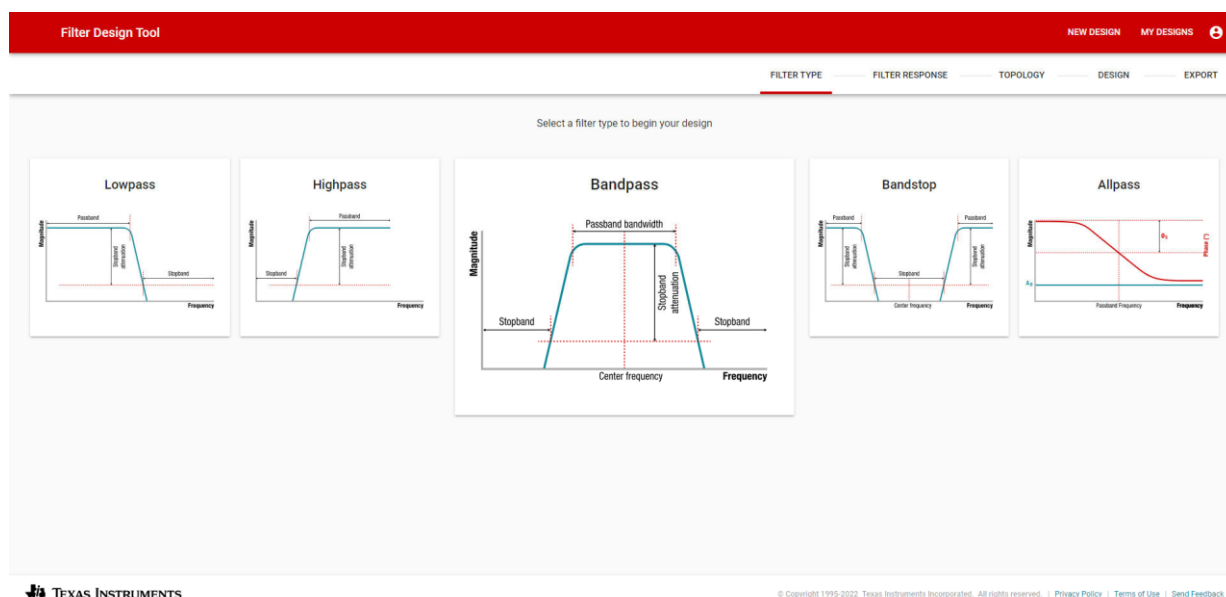
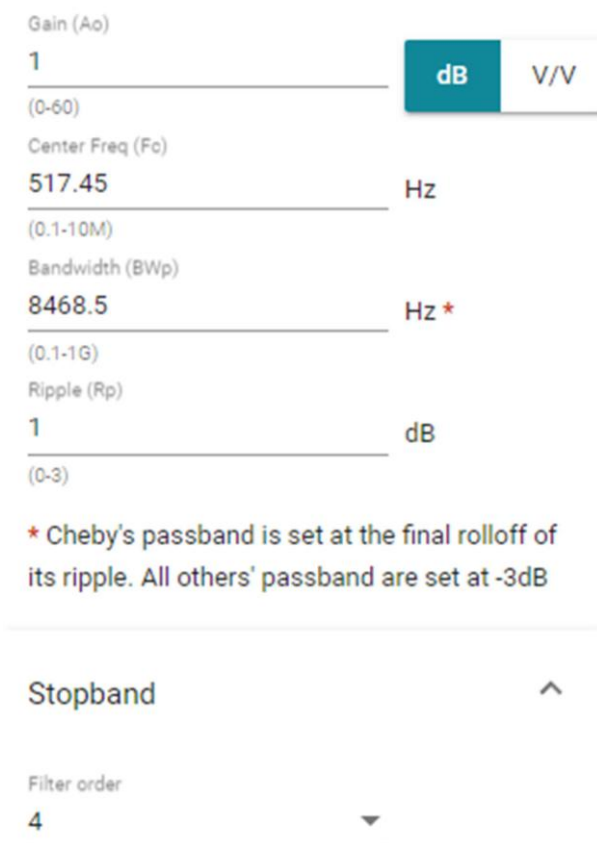


Рисунок 2. Выбор типа фильтра

Центральная частота известна и равна  $\omega_0 = 517,45$  Гц.

Далее зададим параметры полосы пропускания, а именно коэффициент передачи равный 1 дБ, ширину полосы пропускания 8468,5 Гц, пульсацию 1 дБ. В параметрах полосы подавления выставим порядок фильтра 4. Ниже приведён рисунок со всеми выбранными параметрами (рисунок 3).



Gain (Ao)  
1 dB V/V  
(0-60)

Center Freq (Fo)  
517.45 Hz  
(0.1-10M)

Bandwidth (BWp)  
8468.5 Hz \*  
(0.1-1G)

Ripple (Rp)  
1 dB  
(0-3)

\* Cheby's passband is set at the final rolloff of its ripple. All others' passband are set at -3dB

Stopband ^

Filter order  
4 v

Рисунок 3. Выбранные параметры фильтра

Выберем необходимый нам тип передаточной функции и порядок фильтра, а именно Баттерворта (рисунок 4).

View	Filter Response	Order	No. of Stages	Max Q	Stopband Attenuation (dB)
<input type="checkbox"/>	Bessel	4	2	0.578	-0.037
<input checked="" type="checkbox"/>	Butterworth	4	2	0.710	-0.001
<input type="checkbox"/>	Chebyshev	4	2	0.961	0.049

Рисунок 4. Выбор типа передаточной функции

Таким образом, мы получаем АЧХ, ФЧХ, а также групповую задержку

смоделированного фильтра.

По АЧХ мы можем видеть, насколько амплитуда полезного сигнала на выходе отличается от амплитуды подавляемого сигнала (рисунок 5).

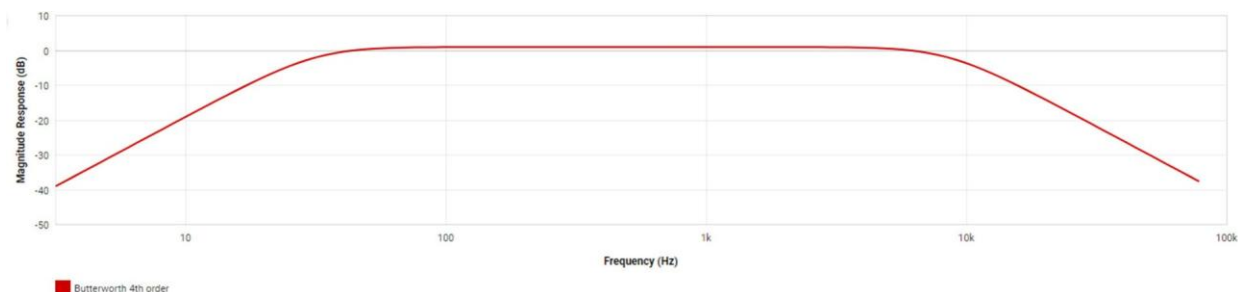


Рисунок 5. АЧХ фильтра

ФЧХ в свою очередь показывает то, на сколько сигнал задерживается в зависимости от частоты (рисунок 6).

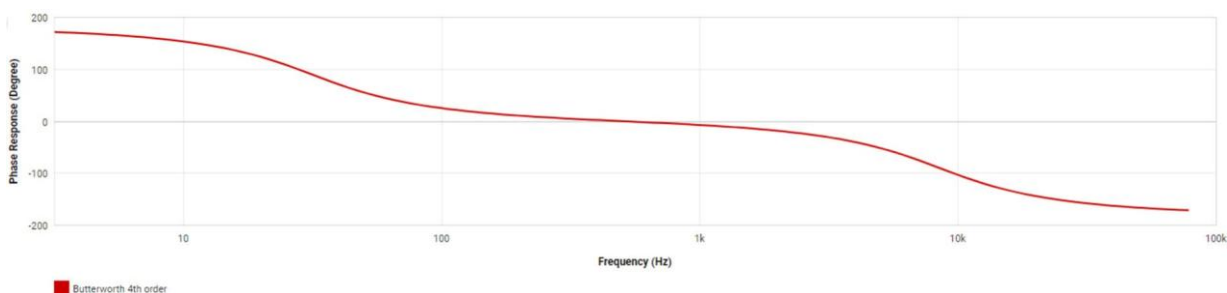


Рисунок 6. ФЧХ фильтра

Групповая задержка характеризует изменение временного сдвига сигнала, возникающего в результате фазового сдвига (рисунок 7). Отклик реализуемого физически фильтра всегда возникает не раньше воздействия на него, при этом фильтр задерживает на некоторое время входной сигнал при. Если подавать на один и тот же фильтр сигналы разной частоты, то на его выходе они могут быть задержаны на разное время.

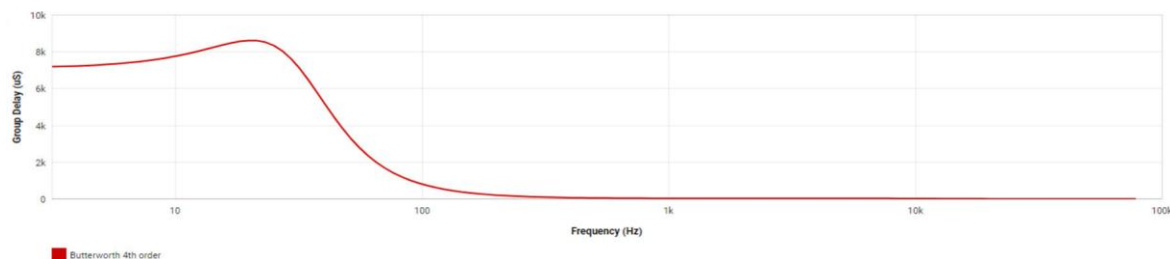


Рисунок 7. Групповая задержка фильтра

Далее перейдём на следующий этап и выберем топологию фильтра. В нашем случае это будет фильтр Саллена-Ки (рисунок 8).

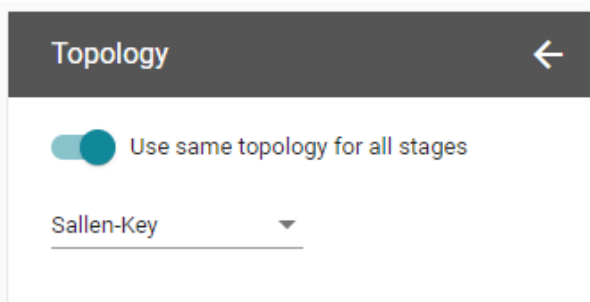


Рисунок 8. Выбор топологии фильтра

На следующем этапе выберем необходимые напряжение питания, полосу пропускания ОУ и непосредственно саму микросхему, а также параметры обвязки. В нашем проекте это THP210, резисторы серии E96 и конденсаторы серии E48 (рисунок 9).

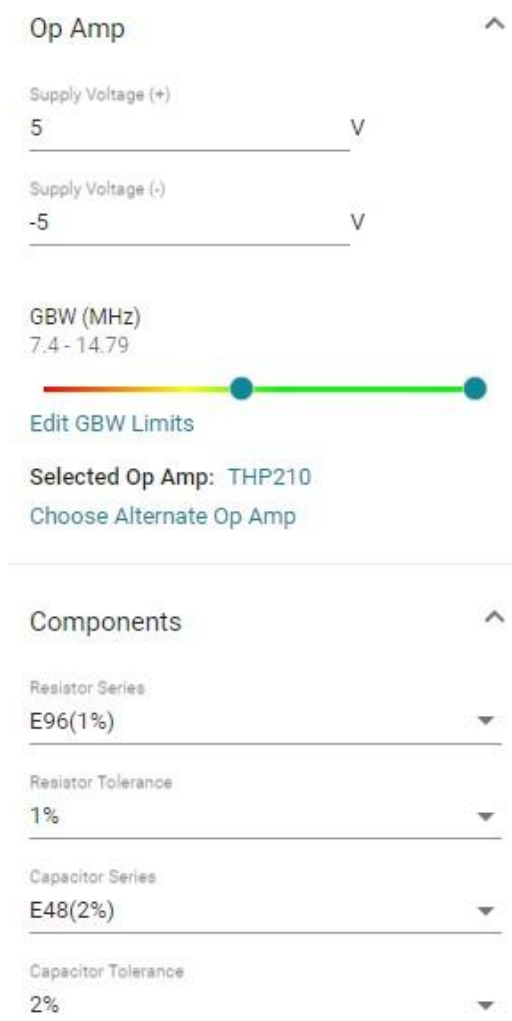


Рисунок 9. Выбор параметров ОУ и обвязки

В центре экрана мы можем увидеть спроектированную принципиальную схему фильтра, а также характеристики 1-го и 2-го каскадов фильтра по отдельности (рисунок 10).

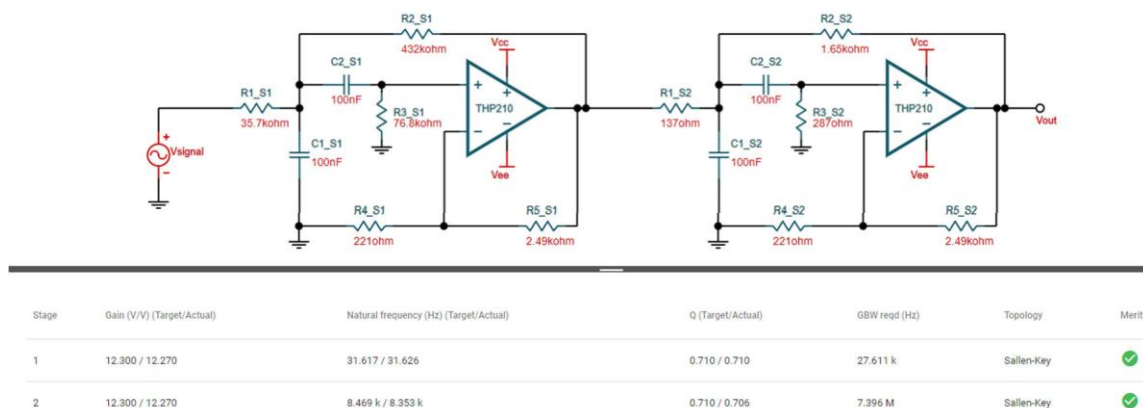


Рисунок 10. Принципиальная схема и характеристики 1-го и 2-го каскадов фильтра

Также на данном, конечном этапе, мы можем видеть короткую сводку характеристик получившегося фильтра (рисунок 11).

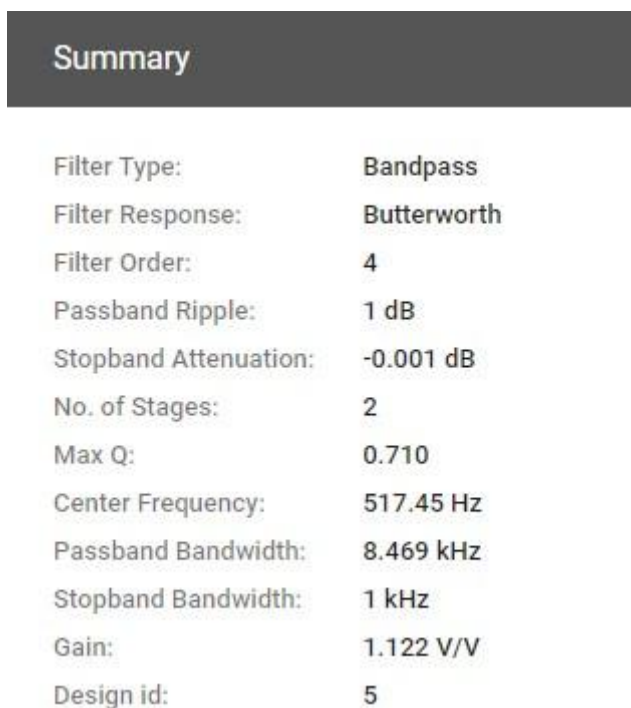


Рисунок 11. Сводка характеристик фильтра

Вывод по результатам моделирования: смоделирован активный

полосно-пропускающий фильтр Баттерворта 4-го порядка, с топологией Саллена-Ки, составленный из 2-х каскадов. Он обладает удовлетворительной добротностью, отклонением по амплитуде в полосе пропускания, является достаточно простым и экономически приемлемым с точки зрения его реализации.

### Литература

1. Пушенко С.Л., Волкова Н.Ю. Производственный шум – как элемент профессионального риска на предприятиях стройиндустрии // Инженерный вестник Дона, 2012, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1124](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1124).
2. Пушенко С.Л., Волкова Н.Ю. Способы и средства снижения шумовых нагрузок на предприятиях стройиндустрии // Инженерный вестник Дона, 2012, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1310](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1310).
3. Szalma J.L., Hancock P.A. Noise effects on human performance: a meta-analytic synthesis. *Psychological bulletin*, 2011. vol. 137(4). pp. 682-707.
4. Smith A. A review of the effects of noise on human performance. *Scandinavian Journal of Psychology*, 1989. vol. 30, №3. pp. 185-206.
5. Gerald P.R., Karzon R.K., Clary R.A. Identification of noise sources that influence distortion product otoacoustic emission measurements in human neonates. *Ear and hearing*, 1998. vol. 19. №4. pp. 319-328.
6. Pleban D. *Occupational Noise and Workplace Acoustics: Advances in Measurement and Assessment Techniques*. USA: CRC Press, 2020. 314 p.
7. Бабский Е.Б., Косицкий Г.И., Ходоров Б.И. Физиология человека. Россия: Рипол Классик, 1972. 655 с.
8. Беранек Л.Л. Акустические измерения. Москва: Издательство Иностранной литературы, 1952. 615 с.





9. Verma S.P., Balan A. Measurement techniques for vibration and acoustic noise of electrical machines. Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives, 1993. №376. pp. 546-551.

10. Fahy F., Walker J. Advanced Applications in Acoustics, Noise and Vibration. CRC Press, 2019. 656 p.

### References

1. Pushenko S.L., Volkova N.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1124](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1124).

2. Pushenko S.L., Volkova N.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1310](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1310).

3. Szalma J.L., Hancock P.A. Psychological bulletin, 2011. vol. 137(4). pp. 682-707.

4. Smith A. A Scandinavian Journal of Psychology, 1989. vol. 30, №3. pp. 185-206.

5. Gerald P.R., Karzon R.K., Clary R.A. Ear and hearing, 1998. vol. 19. №4. pp. 319-328.

6. Pleban D. Occupational Noise and Workplace Acoustics: Advances in Measurement and Assessment Techniques. USA: CRC Press, 2020. 314 p.

7. Babskiy E.B., Kositskiy G.I., Khodorov B.I. Fiziologiya cheloveka [Human physiology]. Russia: Ripol Klassik, 1972. 655 p.

8. Beranek L.L. Akusticheskiye izmereniya [Acoustic measurements]. Moskva: Izdatel'stvo Inostrannoy literatury, 1952. 615 p.

9. Verma S.P., Balan A. Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives, 1993. №376. pp. 546-551.

10. Fahy F., Walker J. Advanced Applications in Acoustics, Noise and Vibration. CRC Press, 2019. 656 p.