

Построение ЛАФЧХ объекта на основе экспериментальных данных

А. А. Тельнов[✉]

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] antel45@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы, связанные с построением диаграммы ЛАФЧХ исследуемой системы на основе экспериментальных данных. В качестве рассматриваемого объекта выступает схема ПИД-регулятора, состоящая из операционного усилителя и пассивных R - и C -элементов. Проведена проверка достоверности полученных результатов при помощи компьютерного моделирования исследуемой цепи в среде схемотехнического моделирования LTspice.

Ключевые слова: эксперимент, ЛАФЧХ, ПИД-регулятор, компьютерная модель, LTspice

Для цитирования: Тельнов А. А. Построение ЛАФЧХ объекта на основе экспериментальных данных // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 7. С. 103–108. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-7-103-108.

Original article

Construction of a Bode Diagram Based on Experimental Data

A. A. Telnov[✉]

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

[✉] antel45@yandex.ru

Abstract. Studies the construction of the Bode diagram of the system under study based on experimental data. The object under consideration is the PID controller circuit, which consists of an operational amplifier and passive R and C elements. The reliability of the results obtained was verified by computer simulation of the circuit under study in the LTspice circuit simulation environment.

Keywords: experiment, Bode diagram, PID controller, computer model, LTspice

For citation: Telnov A. A. Construction of a Bode Diagram Based on Experimental Data // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 7. P. 103–108. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-7-103-108.

Как правило, разработчик системы управления руководствуется усредненной компьютерной моделью разрабатываемого оборудования, составленной на основе расчетных передаточных функций. При этом в ряде случаев возникает необходимость верификации полученных результатов при помощи построения экспериментальных кривых ЛАФЧХ (логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика), исследуемого объекта или узла схемы.

В зарубежной литературе [1] рассматривается метод построения частотных характеристик объекта с использованием специального прибора – анализатора спектра, который позволяет выво-

дить на экран частотную характеристику в виде модуля коэффициента передачи и фазового сдвига от частоты. В данном случае организация измерительного стенда сводится к корректному подключению анализатора спектра к тестируемому устройству (рис. 1).

Здесь с помощью элементов R_1 и C_1 регулируется форма сигнала, поступающего на вход исследуемого объекта. Потенциометр R_1 устанавливает требуемый уровень постоянной составляющей напряжения V_{cc} , а разделительный конденсатор C_1 обеспечивает прохождение переменной составляющей входного воздействия \widehat{V}_z . Стоит

Анализатор спектра

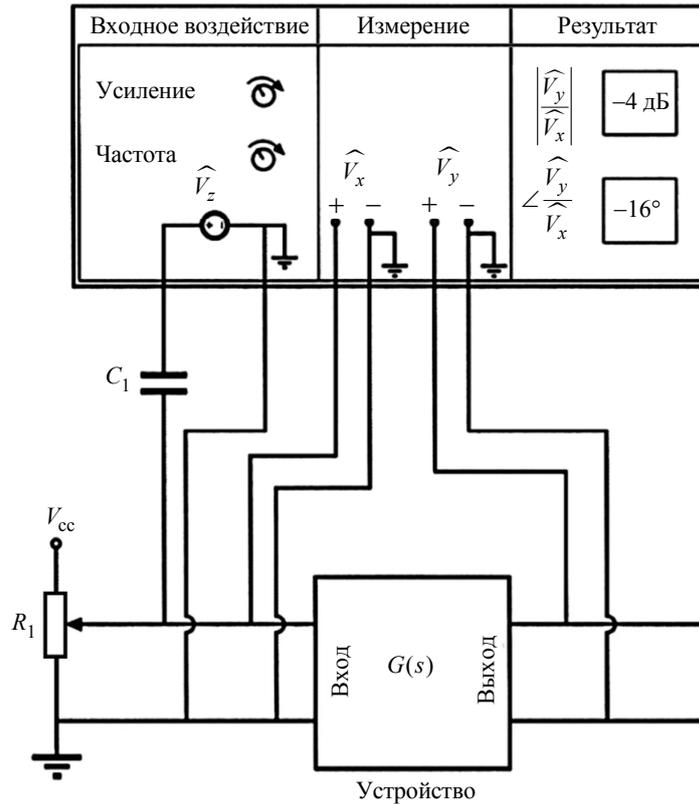


Рис. 1. Подключение анализатора спектра к исследуемому устройству
Fig. 1. Connecting the spectrum analyzer to the device under study

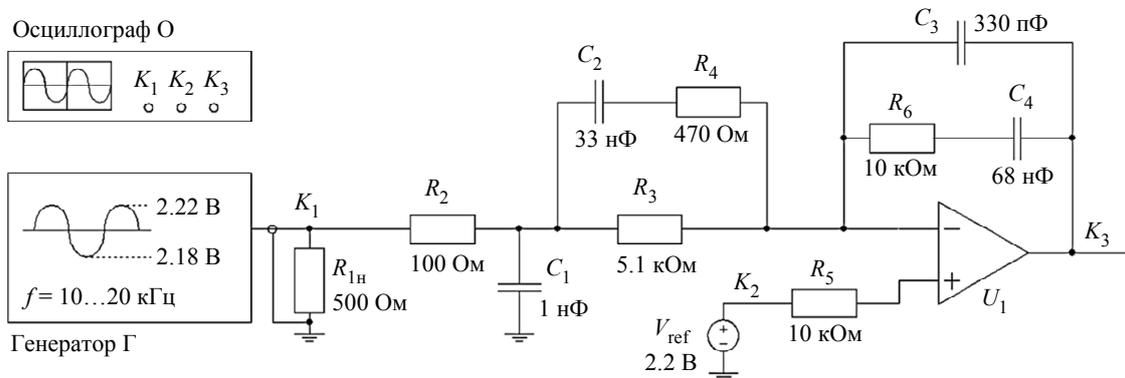


Рис. 2. Эскиз измерительного стенда
Fig. 2. Sketch of the measuring stand

обратить внимание на то, что оба входа анализатора спектра задействованы для измерения реакции, проходящей между входной и выходной клеммами анализируемого прибора.

В таком случае на экране анализатора спектра строится зависимость выходного напряжения от входного, а измеренная передаточная функция имеет вид

$$G(s) = \frac{\widehat{V}_y(s)}{\widehat{V}_x(s)},$$

где \widehat{V}_y и \widehat{V}_x – малые отклонения напряжения.

Однако ввиду высокой стоимости и сложности приобретения данного оборудования автор считает целесообразным поделиться опытом экспериментального построения ЛАФЧХ исследуемой схемы с использованием осциллографа и генератора синусоидального сигнала.

Рассмотрим эскиз измерительного стенда, где в качестве исследуемого объекта выступает цепь, состоящая из операционного усилителя U_1 , источника напряжения V_{ref} и пассивных элементов R и C (рис. 2).

Оборудование, необходимое для проведения измерений, обозначено буквами О и Г, где О –

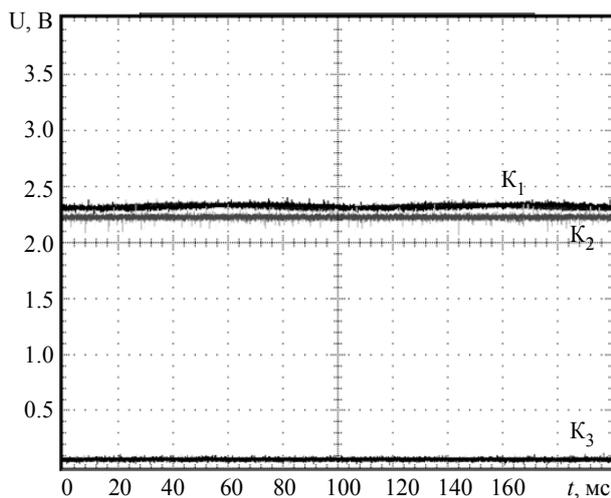


Рис. 3. Режим насыщения ОУ (масштаб по вертикали: K_1 , K_2 и K_3 – 500 мВ/дел; по горизонтали 20 мс/дел)
 Fig. 3. Saturation mode of the opamp (vertical scale: K_1 , K_2 and K_3 – 500 mV/div; horizontal scale 20 ms/div)

осциллограф (TDS360P) с измерительными щупами (пробниками) 1:1, а Г – генератор сигнала специальной формы, например АКПП-3413/1, имеющий на выходных клеммах постоянный уровень напряжения, модулированный синусоидой.

Для исследуемой электрической схемы приняты следующие обозначения: $R_{1н}$ – нагрузочный резистор элементы; R_2 и C_1 выполняют роль фильтра нижних частот; компоненты R_3 – R_6 , C_2 – C_4 и U_1 образуют схему ПИД-регулятора, где в качестве операционного усилителя (ОУ) U_1 использовался внутренний усилитель ошибки микросхемы МС34067; V_{ref} – источник постоянного напряжения; K_1 , K_2 , K_3 – узлы для подключения измерительных щупов осциллографа.

Методика проводимых измерений основана на работе с осциллограммами, полученными при разных частотах синусоидальной составляющей генератора Г. При этом главным условием служит запрет выхода выходного каскада операционного усилителя U_1 (сигнал K_3) в режим насыщения, при котором выход возбужден до максимального положительного или отрицательного значения напряжения, равного напряжению питания ОУ (рис. 3).

Принятые обозначения: K_1 – выходное напряжение генератора Г (синусоидальный сигнал с амплитудой «от пика до пика» 2.3/2.4 В и с частотой 10 Гц); K_2 – опорный сигнал ОУ (2.2 В); K_3 – выходное напряжение ОУ (6 вывод микросхемы МС34067 [2]).

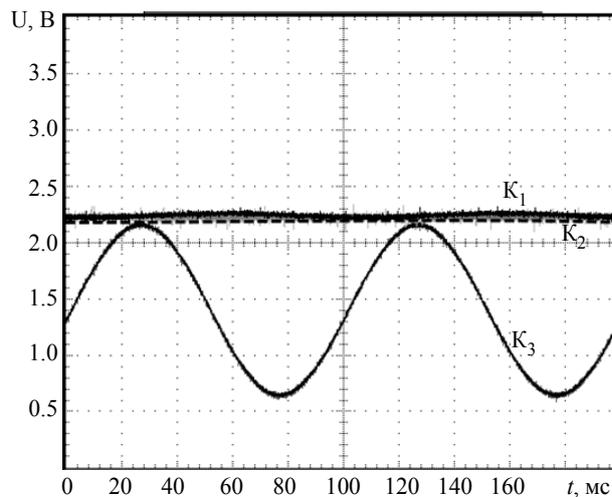


Рис. 4. Требуемый режим работы ОУ
 Fig. 4. Required operating mode of the opamp

В данном случае работа ОУ характеризуется низким уровнем сигнала K_3 во всем диапазоне изменения частоты генератора. С уменьшением верхнего и нижнего порогов (напряжение «от пика до пика» 2.18/2.22В) усилитель выходит из области насыщения, благодаря чему достигается требуемый режим работы при котором ОУ повторяет и усиливает сигнал, поступающий на его инверсный вход (рис. 4).

Для последующей работы удобно перевести осциллограф в режим измерения переменной составляющей (АС-режим) и по возможности осуществить питание от аккумуляторной батареи.

Первым шагом к построению графика ЛАЧХ исследуемой схемы (рис. 2) становится выбор требуемого диапазона частот генератора (пусть $f = (10 \dots 20) \cdot 10^3$ Гц). Тогда для каждого значения f осуществляется графическое измерение амплитуды сигналов K_1 и K_3 с последующим занесением результатов в первые три столбца табл. 1.

Табл. 1. Зависимость усиления схемы от частоты
 Tab. 1. Circuit gain versus frequency

f , Гц	K_1a , В	K_3a , В	$K_1a/2$, В	$K_3a/2$, В	A , дБ
10	0.04	1.52	0.02	0.760	31.596
20	0.04	0.80	0.02	0.40	26.021
30	0.04	0.560	0.02	0.280	22.923
100	0.04	0.194	0.02	0.097	13.715
400	0.08	0.195	0.04	0.098	7.739
800	0.08	0.204	0.04	0.102	8.131
$1 \cdot 10^3$	0.08	0.227	0.04	0.114	9.059
$3 \cdot 10^3$	0.08	0.466	0.04	0.233	15.306
$10 \cdot 10^3$	0.08	1.02	0.04	0.510	22.110
$20 \cdot 10^3$	0.08	1.16	0.04	0.580	23.227

Принятые обозначения: f – частота переменной составляющей генератора; K_1a – амплитуда «от пика до пика» сигнала K_1 ; K_3a – амплитуда «от пика до пика» сигнала K_3 ; $K_1a/2$ и $K_3a/2$ – половинные значения амплитуд K_1 и K_3 ; A – усиление исследуемой схемы.

Рассмотрим пример (рис. 5), соответствующий работе генератора синусоидального сигнала на частоте 30 Гц (третья строка в табл. 1).

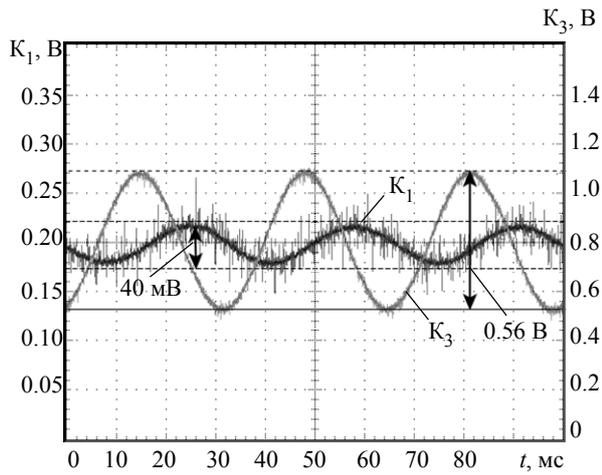


Рис. 5. Осциллограмма при $f = 30$ Гц
Fig. 5. Oscillogram at $f = 30$ Hz

Из табл. 1 следует, что $K_1a = 0.04$ В, а $K_3a = 0.56$ В, тогда

$$\frac{K_1}{2} = \frac{0.04}{2} = 0.02 \text{ В}; \quad \frac{K_3}{2} = \frac{0.56}{2} = 0.28 \text{ В}.$$

Значит, искомое усиление может быть определено по формуле

$$A = 20 \log \left(\frac{\frac{K_3}{2}}{\frac{K_1}{2}} \right) = 20 \log \left(\frac{0.28}{0.02} \right) = 22.923 \text{ дБ}.$$

Дальнейшее заполнение табл. 1 (при других значениях частоты f) позволяет построить график ЛАЧХ, как показано на рис. 6.

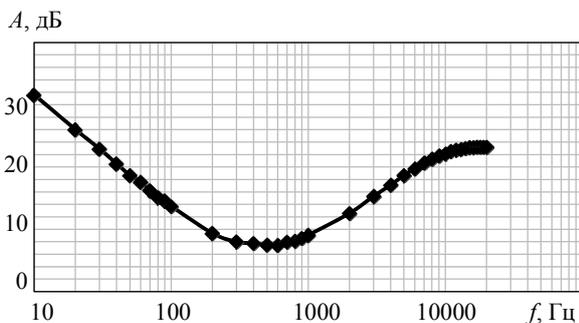


Рис. 6. ЛАЧХ исследуемой схемы
Fig. 6. Frequency response of the studied circuit

В соответствии с полученной кривой частотная характеристика ПИД-регулятора падает на частотах от 10 до 400 Гц – усиление падает с 31.5 до 7.7 дБ, т. е. со скоростью 20 дБ/декада. Знак «минус» относится к отрицательному спаду кривой, что соответствует уменьшению усиления схемы. На частотах от 400 до 700 Гц характеристика пологая, что означает стабильность коэффициента усиления на данных частотах. Также следует отметить, что на частотах от 700 Гц до 10 кГц подъем кривой ЛАХ составляет +15 дБ/декада.

Для построения фазочастотной характеристики (ФЧХ) цепи необходимо измерить временной интервал, характеризующий опережение или отставание одного сигнала относительно другого (рис. 7).

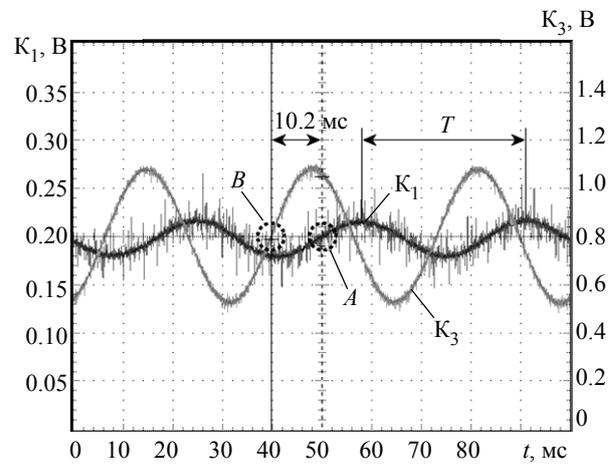


Рис. 7. Осциллограмма измерения временного интервала при $f = 30$ Гц
Fig. 7. Oscillogram time interval measurements at $f = 30$ Hz

Важно отметить, что все измерения необходимо проводить при одинаковых условиях. В данном случае положительный фронт сигнала K_1 всегда устанавливался по центру шкалы X/Y осциллографа (точка A), а время отставания или опережения определялось по моменту перехода сигнала K_3 через ось (точка B).

Данные, полученные графическим методом, заносятся в соответствующие поля табл. 2.

Принятые обозначения: f – частота переменной составляющей генератора; T – период; t – время опережения или отставания; ϕ – угол сдвига фаз.

Вновь обращаясь к рис. 7, обозначим период колебаний T сигнала K_1 как расстояние между соседними вершинами синусоиды. Так как данные вершины сдвинуты друг относительно друга на угол, равный 360° , то фазовый угол ϕ может быть определен методом пропорций: $T, c - 360^\circ; t, c - \phi, \dots^\circ$.

Табл. 2. Зависимость фазового угла от частоты
 Tab. 2. Phase angle versus frequency

f , Гц	$T = 1/f$, с	t , мс	ϕ , ...°
10	0.1	34	123.84
20	0.05	14.8	106.56
30	0.033	10.2	110.16
100	0.01	2.96	106.56
400	0.0025	1.18	169.92
800	0.00125	0.72	207.36
$1 \cdot 10^3$	0.001	0.584	210.24
$3 \cdot 10^3$	0.00033	0.208	224.64
$10 \cdot 10^3$	0.0001	0.060	218.88
$20 \cdot 10^3$	0.00005	0.026	192.96

Отсюда величина ϕ рассчитывается как

$$\phi = \frac{t \cdot 360}{T} = \frac{0.0102 \cdot 360}{0.03333} = 110.16^\circ.$$

С увеличением количества точек измерений появляется возможность построить график ФЧХ рассматриваемой схемы, как показано на рис. 8.

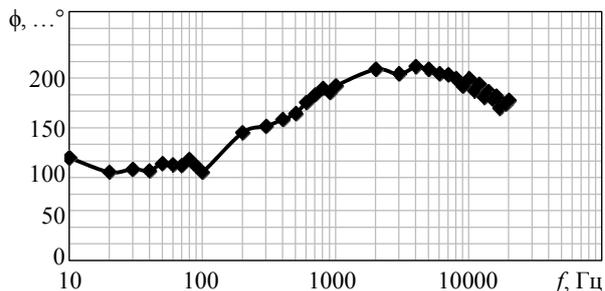


Рис. 8. ФЧХ исследуемой схемы
 Fig. 8. Bode phase diagram of the studied circuit

Для проверки достоверности полученных результатов была смоделирована исследуемая схема в среде схемотехнического моделирования LTspice, как представлено на рис. 9.

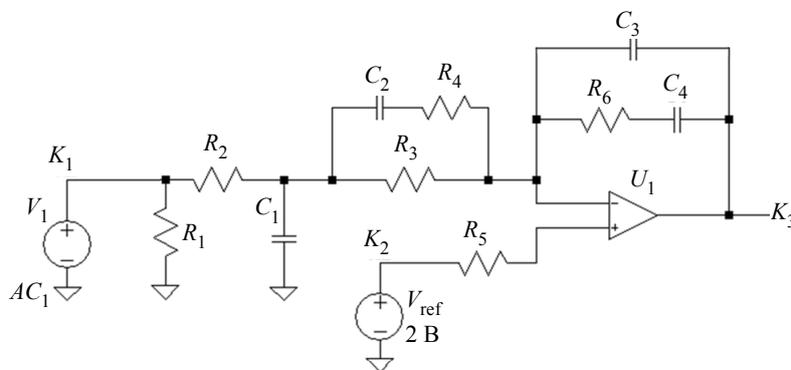


Рис. 9. Компьютерная модель ПИД-регулятора
 Fig. 9. PID controller model

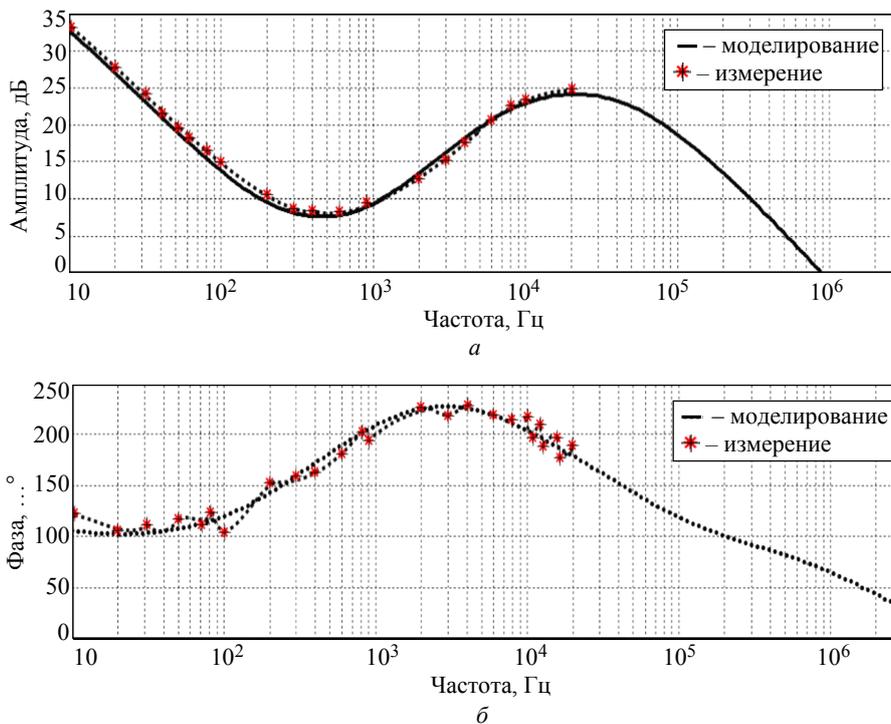


Рис. 10. График сравнения кривых: а – АЧХ; б – ФЧХ
 Fig. 10. Comparison: a – amplitude frequency response; б – phase frequency response

В данной модели помимо описанных ранее элементов добавлен источник переменного напряжения V_1 , где директива AC1 используется для определения частотных характеристик схемы.

Построим диаграмму ЛАФЧХ для измеренных значений и данных, полученных в ходе компьютерного моделирования, на одной координатной оси, как показано на рис. 10.

Сравнивая полученные графики, можно сделать вывод, что вид экспериментальных кривых

согласуется с данными схемотехнического моделирования. Однако рассматриваемый метод имеет существенный недостаток – невозможность точных измерений на частотах, превышающих 20 кГц. По этой причине описанный способ может применяться исключительно в узком частотном диапазоне.

Материалы, используемые в статье, доступны для скачивания по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/Nnps-CuqSVcHqw>.

Список литературы

1. Erickson R. W., Maksimovic D. Fundamentals of Power Electronics. NY: Springer, 2001. 883 p. mi.com/pdf/datasheet/mc34067-d.pdf (дата обращения 13.02.2023).
2. High Performance Resonant Mode Controllers MC34067, MC33067, NCV33067. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mc34067-d.pdf>

Информация об авторе

Тельнов Андрей Александрович – студент гр. 0931 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: antel45@yandex.ru

References

1. Erickson R. W., Maksimovic D. Fundamentals of Power Electronics. NY: Springer, 2001. 883 p. mi.com/pdf/datasheet/mc34067-d.pdf (data obrashheniya 13.02.2023).
2. High Performance Resonant Mode Controllers MC34067, MC33067, NCV33067. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mc34067-d.pdf>

Information about the author

Andrey A. Telnov – student gr. 0931 of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: antel45@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 21.03.2023; принята к публикации после рецензирования 01.06.2023; опубликована онлайн 25.09.2023.

Submitted 21.03.2023; accepted 01.06.2023; published online 25.09.2023.
