

И. М. Мыценко, Д. Д. Халамейда*Институт радиопроизводства и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*E-mail: khalameyda@ire.kharkov.ua

ИМПУЛЬСНЫЙ ЛОГАРИФМИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ УСИЛЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 1 МГц...8 ГГц

В настоящее время проблема перегрузки импульсных радиолокационных приемников отраженными от целей сигналами особенно актуальна, что связано с появлением новых видов радиотехнических систем различного назначения. Для защиты от перегрузки применяется ряд методов: автоматическая регулировка усиления (АРУ) в зависимости от уровня входного сигнала, разделение динамического диапазона на части и многоканальное усиление, применение усилителей с логарифмической амплитудной характеристикой и т. д. Хорошие результаты дает сочетание логарифмического усиления и АРУ сигнала. В статье описан импульсный логарифмический усилитель с инерционной автоматической регулировкой коэффициента усиления сигнала, работающий в диапазоне частот 1 МГц...8 ГГц, приведены его функциональная и принципиальная электрическая схемы. Малогабаритный экспериментальный макет устройства разработан с применением современной элементной базы, что существенно расширило возможности его применения. Рассмотрены физические основы выбора необходимой полосы пропускания, которая не приводит к искажениям спектров радиоимпульсов и динамического режима работы инерционной АРУ. Приведены экспериментально полученные амплитудные характеристики. Параметры макета: коэффициент усиления K_0 на линейном участке ~ 53 дБ; динамический диапазон входных сигналов ~ 55 дБ; входное и выходное сопротивления $R_{вх} \approx R_{вых} = 50$ Ом; напряжение питания ± 12 В (ток потребления 100 мА), ± 5 В (ток потребления 20 мА). Ил. 6. Библиогр.: 4 назв.

Ключевые слова: импульсный логарифмический усилитель, автоматическая регулировка усиления.

Уровень сигналов, отраженных от целей и поступающих на вход приемных устройств радиолокационных станций (РЛС), изменяется в широких пределах до 80...100 дБ [1]. Как известно, приемные устройства с линейной амплитудной характеристикой перегружаются сигналами, величина которых на 20...30 дБ превышает уровень собственных шумов. При этом происходят потери полезных сигналов или искажение информации, получаемой о целях.

Целью настоящей работы является рассмотрение методов борьбы с перегрузкой в приемниках РЛС, исследование импульсных усилителей с логарифмической амплитудной характеристикой и автоматической регулировкой усиления, построение их функциональных схем с применением современной элементной базы.

Для защиты от перегрузки приемников РЛС в настоящее время могут быть использованы следующие методы [2]:

- автоматическая регулировка усиления (АРУ) в зависимости от величины входного сигнала, которая в свою очередь подразделяется на временную, быстродействующую и

инерционную автоматические регулировки усиления;

- разделение динамического диапазона на части и применение многоканального усилителя;

- применение усилителей с логарифмической амплитудной характеристикой.

Временная автоматическая регулировка усиления (ВАРУ) – это программная регулировка, которая обеспечивает равномерный прием сигналов от близких и далеких объектов. Она неэффективна, если изменения сигналов или отражений происходят не плавно при изменении дальности, а скачкообразно.

В случаях, когда использование ВАРУ нецелесообразно и малоэффективно, применяют быструю (мгновенную) автоматическую регулировку усиления (БАРУ). Ее принцип работы основан на селекции сигналов и помех по длительности и амплитуде. К основным недостаткам БАРУ следует отнести то, что она не защищает приемник РЛС от насыщения короткими импульсными помехами и флуктуационными выбросами.

Инерционная автоматическая регулировка усиления (ИАРУ) обеспечивает относительное

постоянство напряжения на входе детектора при изменении входного сигнала в широких пределах. При приеме слабых сигналов от удаленных целей ИАРУ не должна уменьшать коэффициент усиления приемника. В радиолокации находит применение только усиленно-задержанная ИАРУ, которая позволяет поддерживать выходное напряжение приемника относительно постоянным при изменении входного сигнала в широких пределах.

В РЛС с точным измерением дальности применяются усилители с ИАРУ. В угломерных системах целесообразно применять логарифмический усилитель. В РЛС, где необходимо автоматическое измерение как дальности, так и угловых координат, хорошие результаты дает сочетание логарифмического усилителя с ИАРУ.

1. Функциональная схема ИАРУ. Этот комплексный метод положен в основу построения функциональной схемы импульсного логарифмического усилителя промежуточной частоты (рис. 1).

Логарифмический усилитель построен с использованием микросхемы AD8318, амплитудная характеристика которой формируется по принципу суммирования видеосигна-

лов. Частотный диапазон усилителя лежит в пределах 1 МГц...8 ГГц. Предлагаемый усилитель является широкополосным и обладает динамическим диапазоном входных сигналов ~55 дБ. Для дополнительного усиления видеосигналов служит видеоусилитель ВУ-1, который собран на операционном усилителе AD8041.

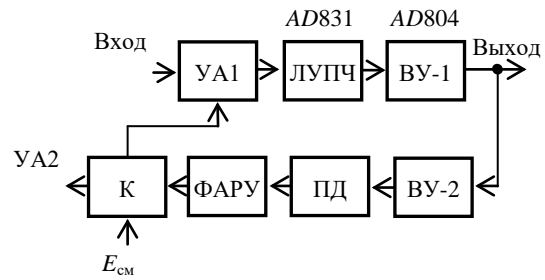


Рис. 1. Функциональная схема импульсного логарифмического усилителя с усиленно-задержанной итерационной АРУ: УА1, УА2 – управляемые напряжением аттенюаторы; ЛУПЧ – логарифмический усилитель промежуточной частоты; ВУ-1,2 – видеоусилители; ПД – пиковый детектор; ФАРУ – фильтр АРУ; К – компаратор (схема сравнения)

Принципиальная электрическая схема логарифмического усилителя ЛУПЧ и видеоусилителя ВУ-1 приведена на рис. 2.

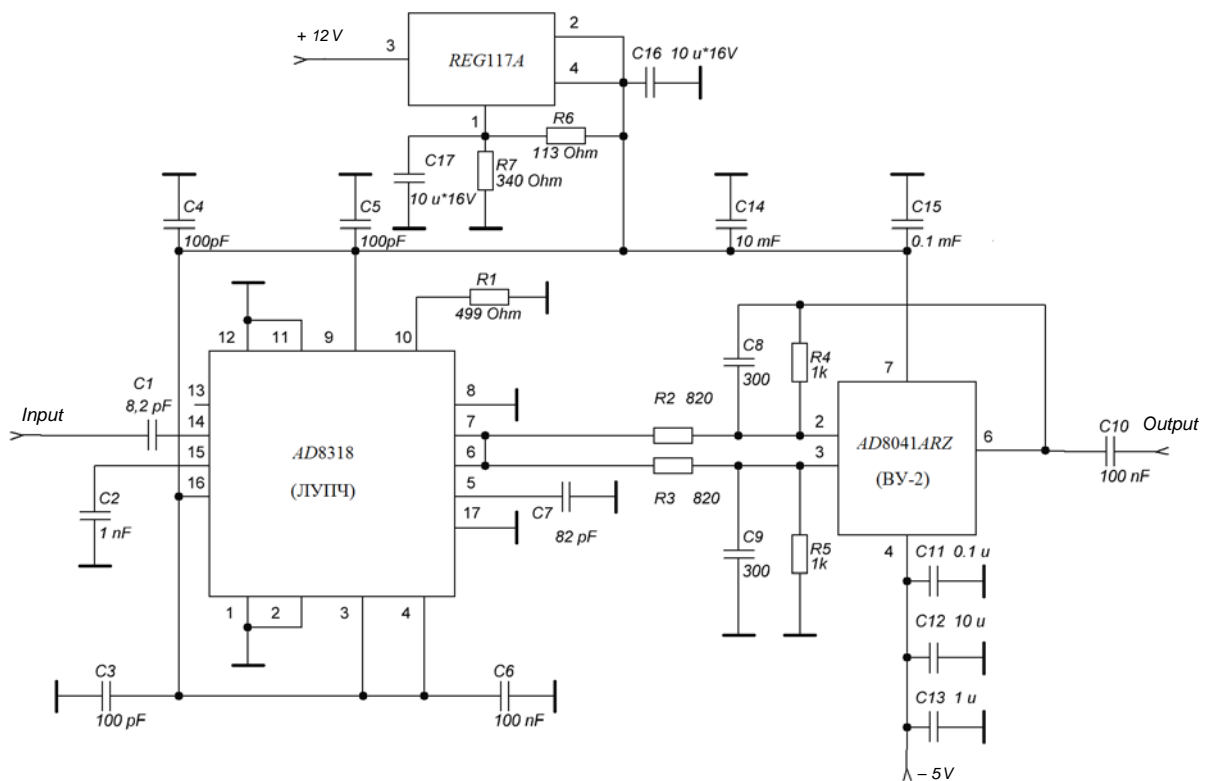


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема ЛУПЧ и ВУ-1

Общий коэффициент усиления K_0 на линейном участке динамической характеристики равен 53 дБ. Экспериментальная амплитудная характеристика логарифмического усилителя приведена на рис. 3. Приведенная схема логарифмического усилителя может быть использована в тракте промежуточной частоты. Для этого необходимо сформировать его амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), которая будет соответствовать ширине спектра принимаемого сигнала и необходимой чувствительности приемника.

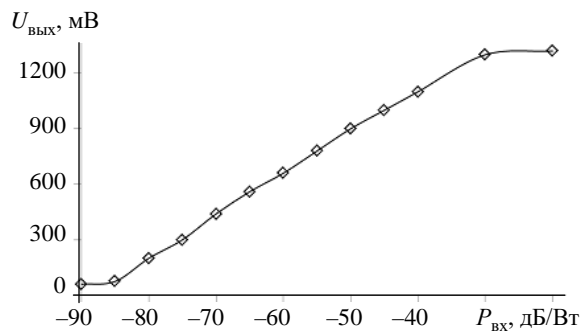


Рис. 3. Амплитудная характеристика ЛУПЧ ($E_1 = +12 \text{ В}$, $E_2 = -5 \text{ В}$, $\tau_{им} = 2 \text{ мкс}$, $f = 2 \text{ ГГц}$, $R_n = 75 \text{ Ом}$)

Типичным для радиолокационных систем является использование периодической последовательности прямоугольных радиоимпульсов (рис. 4), где $\tau_{и}$ – длительность принимаемого радиоимпульса, ω_c – номинальная частота радиоимпульса, $T_{и} = 2\pi/\Omega$ и Ω – период и частота следования импульсов.

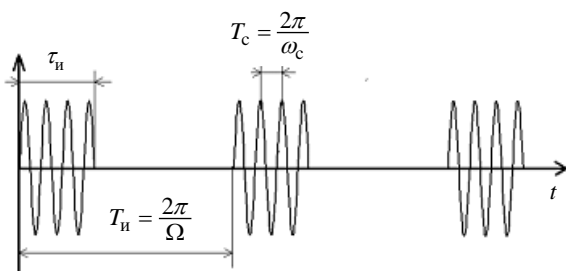


Рис. 4. Периодическая последовательность прямоугольных радиоимпульсов

Как известно [3], различают два вида периодической последовательности прямоугольных радиоимпульсов: когерентную и некогерентную. Для оценки выбора необходимой полосы пропускания рассмотрим когерентную последовательность радиоимпульсов, когда начальные фазы одинаковы и

известны. Форма амплитудно-частотного спектра когерентной периодической последовательности прямоугольных радиоимпульсов приведена на рис. 5.

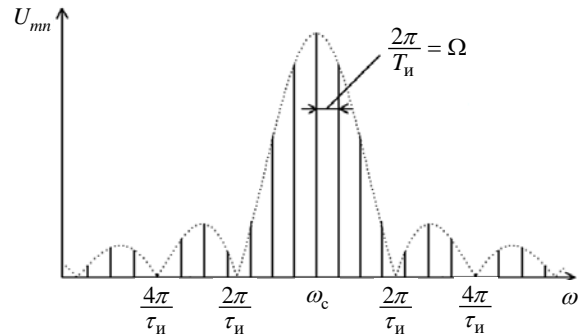


Рис. 5. Спектр периодической последовательности прямоугольных радиоимпульсов

Как видно из рисунка, в центральной лепестке сосредоточена основная часть энергии сигнала, а ширина спектра равна $4\pi/\tau_{и}$. Таким образом, полосу пропускания усилителя Δf можно оценить, воспользовавшись выражением

$$\Delta f \approx \frac{2}{\tau_{и}}$$

Если приемник должен обладать максимальной чувствительностью, а искажения спектра радиоимпульса не принципиальны, то Δf выбирают с точки зрения минимизирования отношения сигнала к шуму. При необходимости получения минимальных искажений фронта радиоимпульса Δf выбирают в соответствии с условием [2]:

$$\Delta f \approx \frac{2}{t_y}$$

где t_y – допустимое время установления импульса на выходе приемника.

В зависимости от поставленных задач, формирование АЧХ осуществляется полосовым фильтром или резонансным малошумящим усилителем, которые включаются на входе логарифмического усилителя. Полосовой фильтр используется в том случае, когда в приемнике уже имеется предварительный усилитель промежуточной частоты (ПУПЧ) и дополнительное усиление будет излишним.

Малошумящий резонансный усилитель (МШУ) на входе логарифмического усилителя дает возможность иметь дополнительное регули-

руемое усиление и улучшить соотношение сигнал/шум. В этом случае необходимость в ПУПЧ отпадает, так как логарифмический усилитель с МШУ на входе имеет необходимую полосу пропускания частот и коэффициент усиления сигнала. Например, при применении однокаскадного резонансного усилителя на промежуточной частоте 60 МГц и $\Delta f = 3$ МГц суммарный коэффициент усиления на линейном участке составил ~60 дБ.

Перейдем к рассмотрению работы ИАРУ (рис. 1). Как известно [2], пиковые детекторы видеоимпульсов используются в цепях импульсных систем АРУ. Они предназначены для преобразования импульсных последовательностей в медленно меняющиеся регулирующие напряжения. Поэтому сигнал с выхода ЛУПЧ с помощью эмиттерного повторителя (ВУ-2) подается на пиковый детектор (ПД). Это необходимо для сохранения постоянной времени заряда между пиковым детектором и видеоусилителем ВУ-1, так как эмиттерный повторитель имеет малое выходное сопротивление. Пиковый детектор «запоминает» максимальное значение напряжения входных импульсов, которое подается на один из входов схемы сравнения К. Схема ИАРУ начинает работать с задержкой только

тогда, когда входной сигнал превышает некоторое заданное значение $U_{п}$ и существует опасность его искажения. Значение $U_{п}$ устанавливается с помощью напряжения смещения $E_{см}$, которое подается на второй вход схемы сравнения К. Таким образом, на выходе схемы сравнения К сигнал управления аттенуатором УА1 возникает только тогда, когда входной сигнал превышает значение $U_{п}$. При уровне входного сигнала меньше $U_{п}$ аттенуатор УА1 имеет минимальную величину ослабления, а тракт промежуточной частоты – максимальное усиление. При превышении входным сигналом значения $U_{п}$ сигнал АРУ с выхода схемы сравнения К подается на управляющий вход аттенуатора АТТ, изменяя его ослабление и удерживая входной сигнал усилителя на необходимом уровне.

На рис. 6 представлена принципиальная электрическая схема усиленно-задержанной ИАРУ. Эмиттерный повторитель собран на транзисторе ММВТ3904, а схема сравнения ОП1 на операционном усилителе AD8041. В качестве управляемого аттенуатора УА2 на входе логарифмического усилителя ЛУПЧ используется микросхема RFSA2033, которая изменяет свое ослабление в пределах 25 дБ в соответствии с подаваемым на его управляющий вход напряжением АРУ.

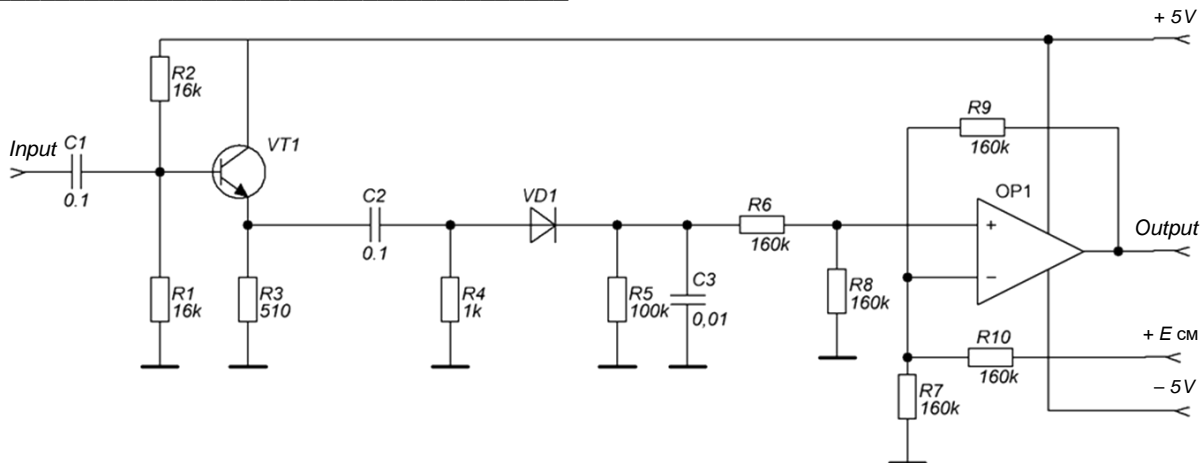


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема усиленно-задержанной ИАРУ

2. Принципиальная электрическая схема усиленно-задержанной ИАРУ. В данной схеме (рис. 6) напряжение задержки ($E_{см}$) подается после фильтра (R_5, C_3). В этом случае оно вычитается из постоянной составляющей напряжения, получаемого на выходе

фильтра, и не приводит к потере ряда сигналов [2], которые временно превысили уровень задержки.

Интерес представляет динамический режим работы ИАРУ. Он описывается дифференциальным уравнением, связывающим ам-

плитуды входного $U_{1\text{уст}}$ и выходного U_2 сигналов.

$$T \frac{dU_2}{dt} + U_2(1 + \alpha K_1 U_{1\text{уст}}) = \alpha K_1 U_{1\text{уст}} - E_{\text{см}} + K_0 U_{1\text{уст}},$$

где T – постоянная времени RC фильтра; U_2 – амплитуда напряжения на выходе усилителя; $U_{1\text{уст}}$ – амплитуда напряжения на входе усилителя; α – угловой коэффициент регулировочной характеристики; K_0 – максимальный коэффициент усиления усилителя на линейном участке; K_1 – коэффициент усиления ИАРУ; $E_{\text{см}}$ – напряжение задержки.

Переходные характеристики ИАРУ представляют собой экспоненциально спадающую зависимость. В момент времени $t=0$ напряжение $U_2 = K_0 U_{1\text{уст}}$, так как напряжение на выходе фильтра равно нулю. Затем $U_2(t)$ экспоненциально спадает до установленного значения $\frac{K_0 U_{1\text{уст}}}{1 + K_{\text{АРУ}}}$, где $K_{\text{АРУ}} = \alpha K_1 U_{1\text{уст}}$ – эквивалентный коэффициент усиления системы АРУ.

Расчет параметров системы ИАРУ детально разработан и изложен в литературе, например [4].

Выводы. Таким образом, в работе исследован импульсный логарифмический усилитель с автоматической регулировкой усиления, который построен на современной элементной базе и имеет следующие параметры:

- коэффициент усиления K_0 на линейном участке ~ 53 дБ;
- динамический диапазон входных сигналов ~ 55 дБ;
- входное и выходное сопротивления $R_{\text{вх}} \approx R_{\text{вых}} = 50$ Ом;
- напряжения питания: ± 12 В (ток потребления 100 мА), ± 5 В (ток потребления 20 мА).

Применение ИАРУ, использующей аттенуатор с максимальным регулируемым ослаблением ~ 25 дБ, дает возможность расширить динамический диапазон до ~ 80 дБ. В случае применения двух управляемых аттенуаторов динамический диапазон расширяется до ~ 105 дБ.

Библиографический список

1. Лукошкин А. П. *Радиолокационные усилители с большим диапазоном входных сигналов*. Москва: Советское радио, 1964. 256 с.
2. Бобров И. В., Максимов Г. В., Мичурин В. И. *Расчет радиоприемников*. Москва: Воениздат, 1971. 496 с.
3. Новиков Ю. Н. *Электротехника и электроника. Теория цепей и сигналов, методы анализа: Учебное пособие*. СПб.: Питер, 2005. 384 с.
4. Тартаковский Г. П. *Динамика систем автоматической регулировки усиления*. Москва: Госэнергоиздат, 1957. 283 с.

REFERENCES

1. Lucoshin, A. P., 1970. *Radar amplifiers with a large range of input signals*. Moscow: Sovetskoye radio Publ. (in Russian).
2. Bobrov, I. V., Maksimov, G. V., Michurin, V. I., 1971. *Radio receivers' calculation*. Moscow, Voenizdat Publ. (in Russian).
3. Novikov, U. N., 2005. *Electrical Engineering and Electronics: Theory of Circuits and Signals, Methods of Analysis: Tutorial*. Saint-Petersburg: Piter Publ. (in Russian).
4. Tartakovsky, G. P., 1957. *Dynamics of automatic gain control systems*. Moscow, Gosenergoizdat Publ. (in Russian).

Рукопись поступила 23.10.2017.

I. M. Mytsenko, D. D. Khalameyda

PULSE LOGARITHMIC AMPLIFIER WITH AUTOMATIC ADJUSTMENT OF AMPLIFICATION IN THE FREQUENCY RANGE FROM 1 MHz TO 8 GHz

At present, the overload problem of pulsed radar receivers of signals reflected from targets is particularly relevant, which is caused by the appearance of new types of radio engineering systems for various purposes. To protect amplifiers against overload, a number of methods are used: automatic gain control (AGC) depending on the level of the input signal, separation of the dynamic range into parts and multichannel amplification, the usage of amplifiers with a logarithmic amplitude characteristic, etc. Good results are obtained by a combination of logarithmic gain and signal AGC. The paper describes a pulsed logarithmic amplifier with inertial automatic adjustment of the signal gain factor, operating in the frequency range from 1 MHz to 8 GHz. The functional and the principal electrical circuits are shown. A small-scale experimental model of the device was developed using a modern element base which greatly expanded the possibilities of its application. The physical basis for selecting the necessary bandwidth, which allows avoiding the distortion of radio pulses spectra and the dynamic mode of operation of the inertial AGC, is considered. Experimentally obtained amplitude characteristics are given. The parameters of the

layout are as follows: the gain factor K_0 in the linear section ~ 53 dB; the dynamic range of input signals ~ 55 dB; input and output resistance $R_{in} \approx R_{out} = 50$ Ohm; supply voltage ± 12 V (consumption current of 100 mA), ± 5 V (consumption current of 20 mA).

Key words: pulse logarithmic amplifier, automatic gain control.

И. М. Миценко, Д. Д. Халамейда

ІМПУЛЬСНИЙ ЛОГАРИФМІЧНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ З АВТОМАТИЧНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ПОСИЛЕННЯ У ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ ВІД 1 МГЦ ДО 8 ГГЦ

На цей час проблема перевантаження імпульсних радіолокаційних приймачів відбитими від цілей сигналів особливо актуальна, що пов'язано з появою нових видів радіотехнічних систем різного призначення. Для захисту від перевантаження застосовується низка методів: автоматичне регулювання посилення (АРП) за-

лежно від рівня вхідного сигналу, поділ динамічного діапазону на частини і багатоканальне посилення, застосування підсилювачів з логарифмічною амплітудною характеристикою та ін. Добрі результати дає поєднання логарифмічного посилення та АРП сигналу. У статті описаний імпульсний логарифмічний підсилювач з інерційним автоматичним регулюванням коефіцієнта посилення сигналу, що працює в діапазоні частот 1 МГц...8 ГГц, наведено його функціональну та принципову електричну схеми. Малогабаритний експериментальний макет пристрою розроблений із застосуванням сучасної елементної бази, що істотно розширило можливості його застосування. Розглянуто фізичні основи вибору необхідної смуги пропускання, яка не призводить до спотворень спектрів радіоімпульсів і динамічного режиму роботи інерційного АРП. Наведено експериментально отримані амплітудні характеристики. Параметри макета: коефіцієнт посилення K_0 на лінійній ділянці ~ 53 дБ; динамічний діапазон вхідних сигналів ~ 55 дБ; вхідний і вихідний опори $R_{вх} \approx R_{вих} = 50$ Ом; напруга живлення ± 12 В (струм споживання 100 мА), ± 5 В (струм споживання 20 мА).

Ключові слова: імпульсний логарифмічний підсилювач, автоматичне регулювання посилення.