

Изобретение относится к элементам устройств автоматики и применяется для выполнения операции дифференцирования электрических сигналов. Устройство может быть использовано для дифференцирования медленно изменяющихся сигналов, например, сигнала, пропорционального частоте в устройствах автоматической частотной разгрузки (АЧР) энергосистем.

Известны дифференциаторы, использующие дифференцирующие свойства конденсаторов и операционные усилители (ОУ). Наиболее простая схема дифференциатора, состоящая из операционного усилителя, между выходом которого и инвертирующим входом включен резистор, а источник входного сигнала подключен к конденсатору, второй конец которого подключен к инвертирующему входу усилителя.

Операционный усилитель, конденсатор и резистор являются общими для этого аналога и предлагаемого дифференциатора. Простейший дифференциатор не пригоден из-за значительного усиления высокочастотных помех, которые насыщают ОУ и из-за потери устойчивости на высоких частотах. Эти недостатки простейшего дифференциатора детально описаны, например, в книге У. Титце, К. Шенк "Полупроводниковая схемотехника". М. "Мир", 1982, ст. 145–148. В книге А.Дх. Пейтон, В. Волк "Аналоговая электроника на операционных усилителях". М. "Бином", 1994, с. 193–202 также отмечены недостатки указанной схемы и приведены способы снижения усиления на высоких частотах, получения активного входного сопротивления для источника входного сигнала. Здесь также отмечено на с.197, что при медленно изменяющихся сигналах сказывается утечка тока через конденсатор, влияют процессы диэлектрической абсорбции конденсатора. Поиски лучших схемных решений активно ведутся и за рубежом. Например, в статье Mohamad Admon Al Alaoui "Stable differentiator with a controllable signal - to - noise ratio. IEEE Transactions on instrumentation and measurement", vol. 37. N03, September, 1988, p. 383–388, или в статье Sarker U.C., Samyal S.K., Nandi R. "A highquality dual-input differentiator". IEEE Transactions on instrumentation and measurement", 1990, vol. 39, № 5, p. 726–729. Отличие этих аналогов от простейшего дифференциатора заключается в том, что последовательно с конденсатором, подключенным к инвертирующему входу ОУ, подсоединен резистор, а параллельно резистору, включенному между выходом ОУ и его инвертирующим входом, включен второй конденсатор. Общими элементами для аналогов и предлагаемого дифференциатора являются ОУ, конденсатор и два резистора. Эти дополнительные резистор и конденсатор изменяют частотную характеристику дифференциатора и его входное сопротивление, что устраняет неустойчивость дифференциатора на высоких частотах и снижает на этих частотах усиление. Однако на низких частотах частотная характеристика также изменялась, существенно отличаясь от частотной характеристики идеального дифференциатора. Для получения достаточного усиления на низких частотах необходимо иметь большую постоянную времени дифференциатора (произведение емкости конденсатора на значение сопротивления резистора обратной связи). При большой емкости конденсатора растут его утечки и, конечно, габаритные размеры, а при большой величине резистора в цепи обратной связи ОУ сказываются входные токи ОУ и растет усиление на высоких частотах из-за увеличения и емкости и сопротивления. Одним из способов уменьшения емкости конденсатора и сопротивления резистора является включение в цепь обратной связи ОУ интегратора на втором ОУ.

Наиболее близким по существенным признакам к предлагаемому (прототип) является дифференциатор по рис. 8,5 г. книги Щербаков В.М., Грездов Г.И. "Электронные схемы на операционных усилителях". Киев. "Техніка", 1983, стр. 142, состоящий из первого операционного усилителя, неинвертирующий вход которого соединен с общей точкой устройства, а к инвертирующему входу подключен резистор, второй конец которого соединен с выходом второго операционного усилителя, к неинвертирующему входу которого подключены два резистора, вторые концы которых соединены с выходом первого и второго операционных усилителей соответственно, и резистора, одним концом подключенного к источнику входного сигнала, а также конденсатора (перечислены совпадающие признаки), второй конец которого соединен с общей точкой, инвертирующий вход второго операционного усилителя соединен с двумя резисторами, вторые концы которых соединены с выходом этого усилителя и общей точкой устройства, а источник сигнала через резистор подсоединен к инвертирующему входу первого усилителя.

В прототипе за счет передаточной функции интегратора, образованного вторым усилителем и связанными с ним четырьмя резисторами и конденсатором, возможно увеличение постоянной времени при приемлемых значениях емкости конденсатора и значений сопротивлений резисторов, но сохраняется высокое значение усиления на высоких частотах, приводящее к насыщению усилителя и искажению выходного сигнала устройства. Такой недостаток очень существенен в устройствах автоматики энергосистем, где высок уровень электромагнитных помех. Достоинством прототипа является независимость от частоты входного сопротивления дифференциатора.

Задачей изобретения является создание дифференциатора, который дифференцирует очень медленно изменяющиеся сигналы и не усиливает высокочастотные помехи.

Дифференциатор, состоящий, как и известный из конденсатора, первого операционного усилителя, неинвертирующий вход которого соединен с общей точкой устройства, к инвертирующему входу которого подключен резистор, второй конец которого соединен с выходом второго операционного усилителя, к неинвертирующему входу которого подключены два резистора, вторые концы которых соединены с выходом первого и второго операционных усилителей соответственно, и резистора, одним концом подключенного к источнику входного сигнала, отличающийся тем, что конденсатор подключен между выходом и инвертирующим входом первого операционного усилителя, инвертирующий вход второго операционного усилителя соединен с общей точкой, а второй конец резистора, подключенного к источнику входного сигнала, подключен к неинвертирующему входу второго операционного усилителя.

Несмотря на почти полное совпадение существенных признаков с прототипом предложенное устройство имеет совершенно другой принцип действия и производной входного сигнала пропорциональна от-

носительная разность длительностей импульсов двух полярностей на выходе устройства, то есть предложенное устройство представляет собой широтно-импульсный дифференциатор. Такой принцип действия обеспечивает высокую стабильность нуля, возможность дифференцирования сколь угодно медленно изменяющихся сигналов и слабую подверженность влиянию высокочастотных помех. Кроме того, широтно-импульсный выход позволяет просто осуществить переход к цифровому представлению результата и просто осуществить умножение выходного сигнала, пропорционального производной входного сигнала, на другой сигнал и получить важные функции преобразования, сложно реализуемые другими путями.

Предлагаемое устройство изображено на фиг. 1; на фиг. 2 даны временные диаграммы, поясняющие работу устройства.

Дифференциатор содержит первый операционный усилитель 1, второй операционный усилитель 2, конденсатор 3 и четыре резистора 4, 5, 6 и 7. Усилитель 1 с конденсатором 3 и резистором 4 на входе образуют интегратор, а усилитель 2 с резистором 5 образуют компаратор с положительной обратной связью (триггер Шмитта) через резистор 5. Выход ОУ 2 будем считать стабильным, отличающимся только знаком в двух состояниях. Величины напряжения на выходе компаратора обозначены  $U_0$ . Выход компаратора подключен через резистор 4 к входу интегратора и, следовательно, входной ток конденсатора постоянен, а напряжение на нем изменяется линейно в направлении, зависящем от знака напряжения на выходе ОУ 2. Выход интегратора через резистор 6 подключен к входу ОУ 3. Входной сигнал  $x(t)$  подключен через резистор 7 к неинвертирующему входу ОУ 2.

Дифференциатор работает следующим образом.

Выходное напряжение ОУ 2 через резистор 5 удерживает его в начальном состоянии до тех пор, пока по мере заряда конденсатора 3 не изменит знак напряжение на неинвертирующем входе ОУ 2. Так как изменение знака происходит в момент времени  $t_1$  рис. 2а и 2в, когда потенциал неинвертирующего входа равен нулю, то напряжение на конденсаторе 3 в этот момент  $U_{n1}$  можно определить из равенства нулю суммы токов в неинвертирующем входе ОУ 2. Пренебрегая входным током ОУ 2, получим при отрицательном напряжении на выходе ОУ 2, когда напряжение на конденсаторе 3 линейно растет рис. 2а и 2в

$$\frac{U_{n1}(t_1)}{R6} + \frac{x(t_1)}{R7} - \frac{E}{R5} = 0, \quad (1)$$

откуда

$$U_{n1}(t) = + \left( \frac{E}{R5} - \frac{x(t_1)}{R7} \right) R6, \quad (2)$$

где  $t_1$  – момент времени переключения ОУ 2 при положительном напряжении на конденсаторе 2.

После переключения триггера, напряжение на выходе ОУ 2 изменит знак, напряжение на конденсаторе начнет линейно падать рис. 2а и 2в и переключение произойдет в момент времени  $t_2$ , а напряжение переключения  $U_{n2}(t_2)$  определится аналогично (1) из уравнения

$$\frac{U_{n2}(t_2)}{R6} + \frac{x(t_2)}{R7} - \frac{E}{R5} = 0, \quad (3)$$

откуда

$$U_{n2}(t_2) = + \left( \frac{E}{R5} - \frac{x(t_2)}{R7} \right) R6, \quad (4)$$

Аналогично, в начале предыдущего цикла понижения напряжения на конденсаторе 3 напряжение переключения  $U_{n0}(t_0)$  определится соотношением

$$U_{n0}(t_0) = + \left( \frac{E}{R5} - \frac{x(t_0)}{R7} \right) R6, \quad (5)$$

Изменение напряжения на конденсаторе 3 осуществляется на смежных циклах постоянным током одной и той же величины, но разных знаков

$$i_c = C \frac{dU_c}{dt} = \frac{E}{R4}, \quad (6)$$

откуда

$$\Delta U_c = \int_{U_{nh}}^{U_{nk}} dU_c = \frac{\pm E}{CR4} \int_{t_h}^{t_k} dt, \quad (7)$$

где индексы Н и К означают начало цикла и его конец.

Из (7) при изменении напряжения на конденсаторе 3 от  $U_{n0}$  до  $U_{n1}$  за время от  $t_0$  до  $t_1$  получим

$$\Delta U_{c1} = U_{n1} - U_{n0} = \frac{E}{CR4} (t_1 - t_0) = \frac{E}{CR4} T_1, \quad (8)$$

а на следующем интервале времени от  $t_1$  до  $t_2$  получим

$$\Delta U_{c2} = U_{n2} - U_{n1} = - \frac{E}{CR4} (t_2 - t_1) = - \frac{E}{CR4} T_2, \quad (9)$$

где  $T_1 = t_1 - t_0$ , а  $T_2 = t_2 - t_1$ . (10)

Подставив (2), (4) и (5) в (8) и (9) получим, что

$$T_1 = \frac{CR4R6}{E} \left[ \frac{2E}{R5} - \frac{x(t_1)}{R7} + \frac{x(t_0)}{R7} \right] \quad (11)$$

$$T_2 = \frac{CR4R6}{E} \left[ \frac{2E}{R5} - \frac{x(t_1)}{R7} + \frac{x(t_2)}{R7} \right] \quad (12)$$

зависят от изменения сигнала за этот интервал времени, как показано на рис. 2б и 2 г.

Откуда

$$T_2 - T_1 = \frac{CR4R6}{E} \left[ \frac{x(t_2) - x(t_0)}{R7} \right] \quad (13)$$

Если учесть, что длительность цикла

$$T = t_2 - t_0 = T_1 + T_2 \quad (14)$$

мала по сравнению с периодом  $T_B$  высшей гармоники сигнала, то можно считать, что

$$T = \Delta t \approx dt \ll T_B \quad (15)$$

а за это малое время сигнал  $x(t)$  также изменяется на малую величину  $\Delta t \approx dx$

$$\Delta x \approx dx = x(t_2) - x(t_0). \quad (16)$$

Тогда из (13)

$$T_2 - T_1 = \frac{CR4R6}{R7E} dx, \quad (17)$$

а относительная разность длительностей цикла широтно-импульсной модуляции

$$\tau = \frac{T_2 - T_1}{T_2 + T_1} = \frac{CR4R6}{R7E} \frac{dx}{dt}, \quad (18)$$

что и требовалось доказать: в предлагаемом устройстве формируется широтно-импульсный сигнал, пропорциональный производной входного сигнала. Устройство можно назвать широтно-импульсным дифференциатором.

При  $x(t) = 0$  из (10) и (12) следует, что оба интервала  $T_1$  и  $T_2$  одинаковы (рис. 2а, 2б)

$$T_1 = T_2 = \frac{2CR4R6}{R5} \quad (19)$$

и не зависят от напряжения питания  $E$ . Пороги переключения также одинаковы по величине рис. 2а

$$|U_{n1}| = |U_{n2}| = \frac{R6}{R5} E. \quad (20)$$

При постоянном входном сигнале  $x(t) = x_0$  пороги отличаются на одинаковую величину

$$U_{n1} = \left[ \frac{E}{R5} - \frac{x_0}{R7} \right] R6, \quad (21)$$

$$U_{n2} = \left[ \frac{E}{R5} - \frac{x_0}{R7} \right] R6, \quad (22)$$

но временные интервалы, как следует из (11) и (12), по-прежнему определяются соотношением (19) и их разность (13) равна нулю. Относительная разность длительностей  $\tau$  отлична от нуля только при наличии производной входного сигнала (18).

Устройство имеет очень стабильный нуль, что позволяет определять очень низкие значения производной сигнала. При этом частота ШИМ может быть выбрана также низкой. Из рис. 2в видно, что при наличии помехи возможно искажение значения одного из интервалов, но это искажение зависит от амплитуды помехи и не зависит от ее частоты. С ростом частоты помехи не будет происходить увеличения ее влияния на дифференциатор. Учитывая, что помеха не синхронна с сигналом, ее среднее воздействие на отрезке времени, превышающем длительность одного цикла ШИМ, будет уменьшаться.

При стабильном напряжении  $E$  среднее значение напряжения на выходе устройства также пропорционально производной сигнала

$$U_{cp} = \frac{ET_2 - ET_1}{T_1 + T_2} = E\tau = \frac{CR4R6}{R7} \frac{dx}{dt}. \quad (23)$$

Если же выходным напряжением устройства переключать ключи амплитудного модулятора, запитанного другим сигналом  $Y(t)$ , то среднее значение напряжения на выходе модулятора будет пропорционально произведению  $Y(t)$  на производную сигнала  $x(t)$

$$U_{cp} = Y\tau = \frac{CR4R6}{R7E} Y \frac{dx}{dt} = KY \frac{dx}{dt}. \quad (24)$$

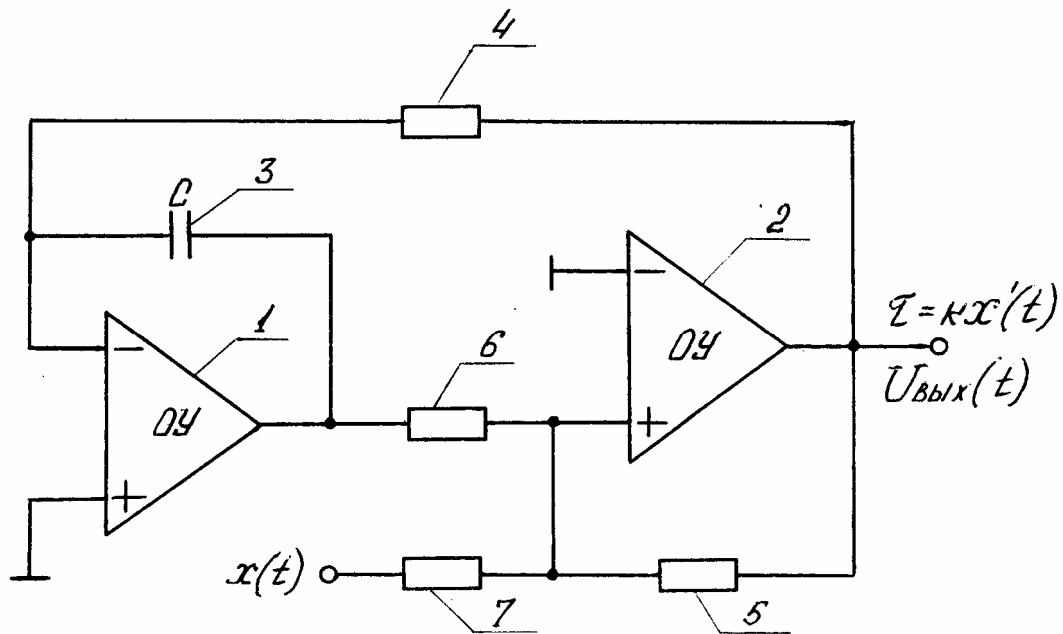
Такой функционал в ряде случаев необходим для оценки энергетических характеристик нелинейных электропотребителей для формирования функционалов

$$Z_1 = Ki \frac{du}{dt} \text{ или } Z_2 = KU \frac{di}{dt}.$$

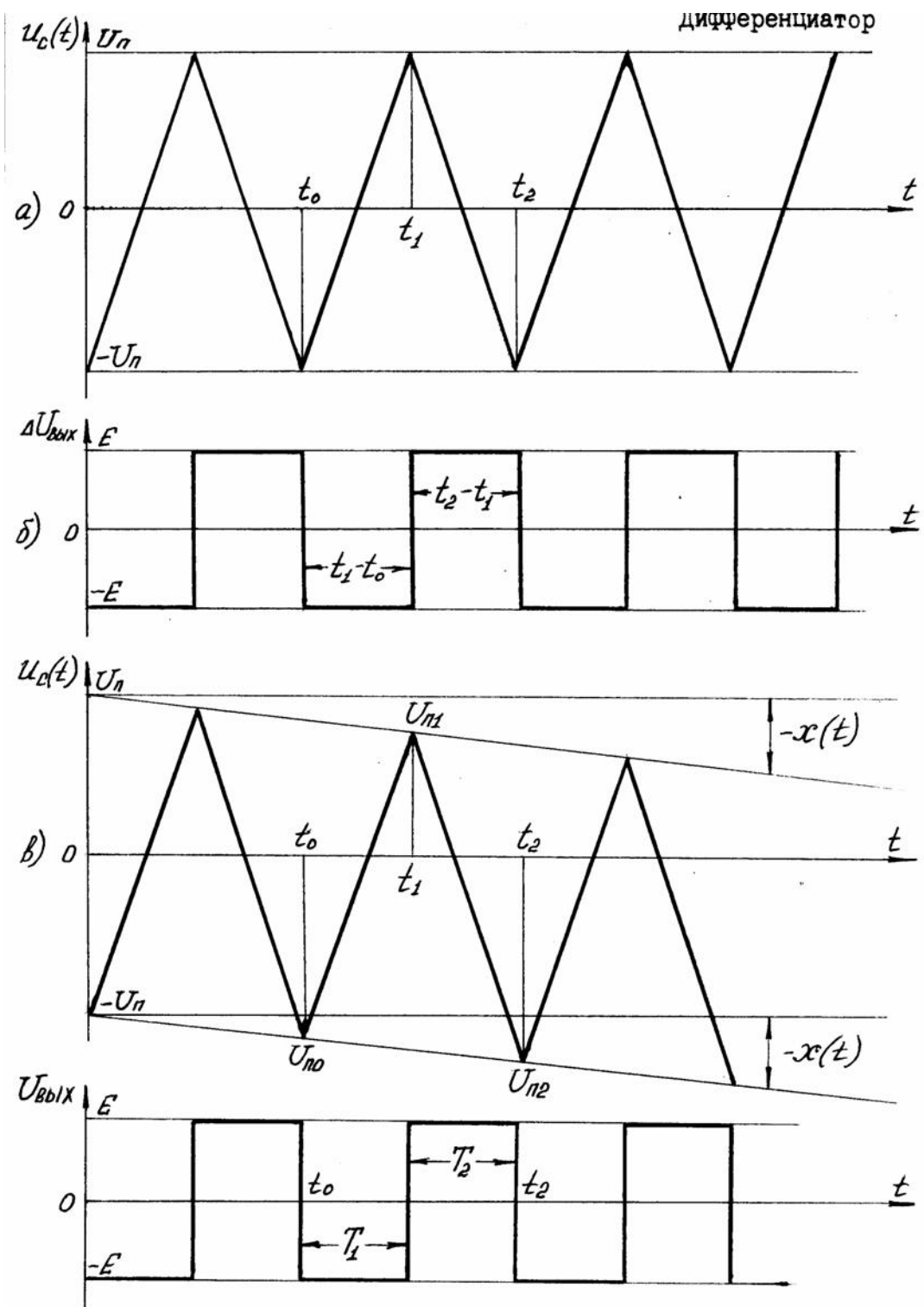
Широтно-импульсный выход дифференциатора пригоден также для преобразования производной в цифровую форму путем заполнения счетчика импульсами высокой частоты в течение заданного времени интервалов положительных выходных импульсов устройства и списывания из счетчика импульсов высокой частоты на интервале отрицательных выходных импульсов устройства.

Метод пригоден не только для дифференцирования очень медленно изменяющихся сигналов, но и дифференцирования сигналов промышленной частоты. Но в этом случае частота ШИМ  $f_0$  при нулевом сигнале должна значительно превосходить частоту сигнала. В таком режиме авторы апробировали дифференциатор с  $f_0 = 2$  кГц для измерения реактивной мощности в сетях промышленной частоты. Основным назначением устройства при его разработке было дифференцирование сигнала, пропорционального частоте электрической системы или ее части при максимальном значении производной 10% в секунду и нормальном уровне производной 0,1% в секунду.

Необходимо отметить, что в реальной схеме дифференциатора для исключения влияния процессов в нем на источник входного сигнала между входами ОУ 2 целесообразно включить два встречносоединенных диода, что не влияет на момент переключения, при котором напряжение на диодах равно нулю.

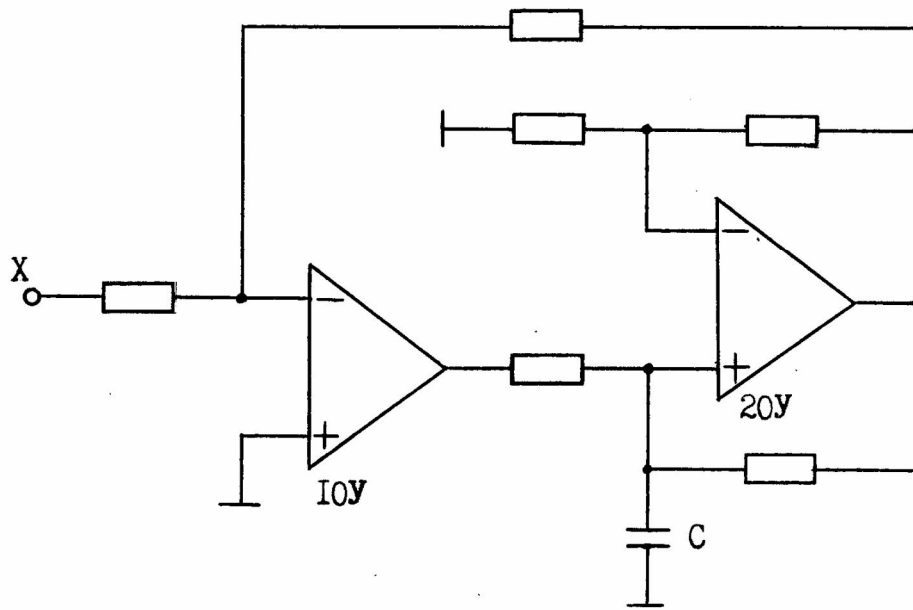


Фиг. 1



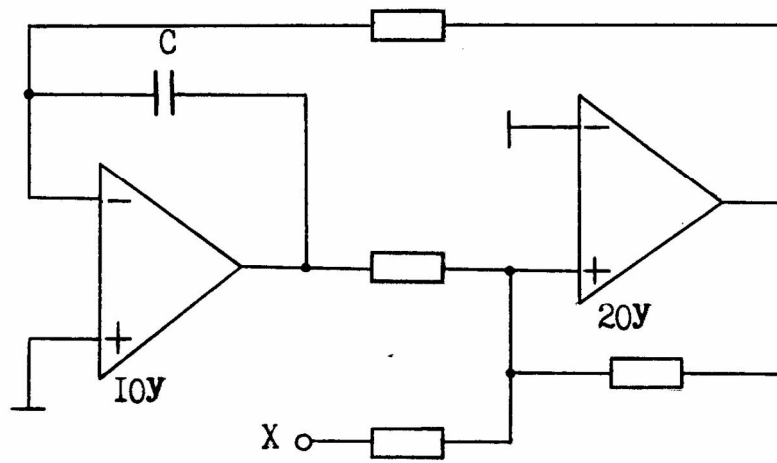
Фиг. 2

ПРОТОТИП



Фиг. 3

ПРЕДЛАГАЕМОЕ УСТРОЙСТВО



Фиг. 4

---

Тираж 50 екз.

Відкрите акціонерне товариство «Патент»  
Україна, 88000, м. Ужгород, вул. Гагаріна, 101  
(03122) 3 – 72 – 89      (03122) 2 – 57 – 03

---