



Федеральное агентство связи  
Ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Московский технический университет связи и информатики»  
**Волго-Вятский филиал**

---

Кафедра инфокоммуникационных и профессиональных дисциплин

## Лабораторная работа № 14

### **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМИ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ (АВТОГЕНЕРАТОРОВ)**

Методические указания к лабораторной работе  
по дисциплине «Теория электрических цепей»

Нижний Новгород  
2019

Составитель: М.Г. Тылес.

**Исследование свойств четырехполюсников с положительными обратными связями (Автогенераторов).** Метод. указания к лаб. работе/  
Составитель: М.Г. Тылес.– Н.Новгород, ВВФ МТУСИ 2019.

Дано описание лабораторной работы по курсу «Теория электрических цепей», иллюстрирующей материал разделов: обратные связи в четырехполюсниках, автоколебательные системы.

В методических указаниях приводится программа исследований автогенераторов гармонических и релаксационных колебаний в виртуальной лаборатории – компьютерном классе при использовании программного комплекта *Micro-CAP*.

Методические указания к лабораторной работе предназначены для студентов дневной и заочной форм обучения по направлению «Телекоммуникации»

Издание одобрено на заседании кафедры ИКиПД «\_26\_» ноября 2019 г.  
Протокол № 21

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1. Условия возникновения колебаний

На рис. 1 представлена структурная схема автогенератора (стрелки внутри блоков указывают направление передачи сигнала), состоящего из усилителя, имеющего комплексный коэффициент передачи  $\underline{H}_U(j\omega) = |\underline{H}_U(j\omega)|e^{j\varphi_H(\omega)}$ , и частотно-зависимой цепи обратной связи с комплексным коэффициентом передачи  $\underline{\beta}_U(j\omega) = |\underline{\beta}_U(j\omega)|e^{j\varphi_\beta(\omega)}$ .

В состав цепи обратной связи может входить, например, колебательный контур.

Выясним условия генерирования стационарных колебаний системой с замкнутой

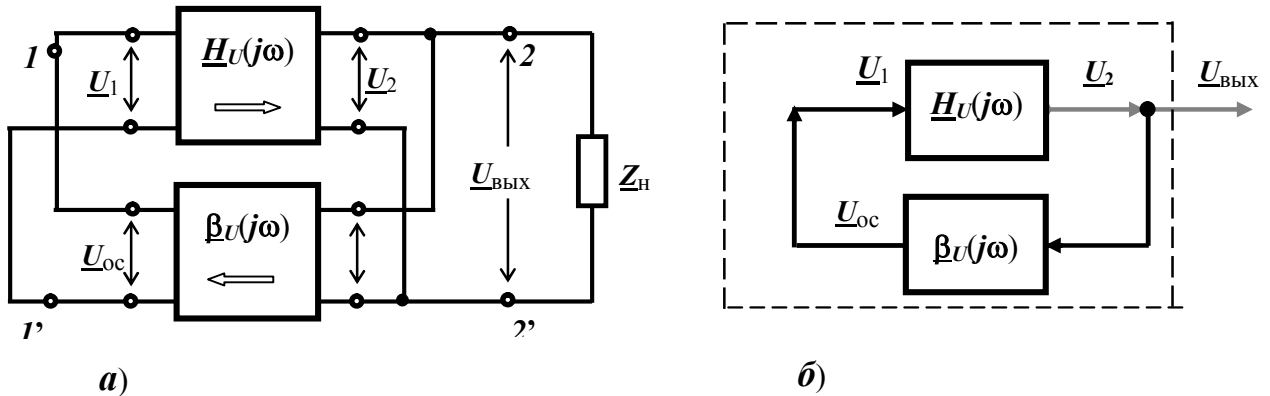


Рис. 1. Структурные схемы автогенератора гармонических колебаний:

а) основная;

б) упрощенная.

петлей обратной связи (рис. 1, б). В стационарном режиме гармонических колебаний комплексная амплитуда  $\underline{U}_{\text{вых}} = \underline{U}_2$  напряжения на выходе усилителя в  $|\underline{H}_U(j\omega)|$  раз больше комплексной амплитуды  $\underline{U}_1$  напряжения на входе усилителя. Между этими напряжениями возникает фазовый сдвиг  $\varphi_H(\omega)$ . Итак,

$$\underline{U}_{\text{вых}} = \underline{U}_1 \cdot \underline{H}_U(j\omega) = \underline{U}_1 \cdot |\underline{H}_U(j\omega)|e^{j\varphi_H(\omega)}.$$

При этом комплексная амплитуда  $\underline{U}_{\text{ос}}$  напряжения обратной связи составляет

$$\underline{U}_{\text{ос}} = \underline{U}_{\text{вых}} \cdot \underline{\beta}_U(j\omega) = \underline{U}_{\text{вых}} \cdot |\underline{\beta}_U(j\omega)|e^{j\varphi_\beta(\omega)}.$$

Между напряжениями  $\underline{U}_{\text{ос}}$  и  $\underline{U}_{\text{вых}}$  возникает фазовый сдвиг  $\varphi_\beta(\omega)$ .

Условием генерации стационарных колебаний является равенство выходного напряжения цепи обратной связи  $\underline{U}_{\text{ос}}$  и входного напряжения  $\underline{U}_1$  усилителя:

$$\underline{U}_{\text{ос}} = \underline{U}_{\text{вых}} \cdot \underline{\beta}_U(j\omega) = \frac{\underline{U}_{\text{вых}}}{\underline{H}_U(j\omega)}.$$

Следовательно, модуль комплексного коэффициента петлевой передачи должен равняться:

$$|\underline{\beta}_U(j\omega)| \cdot |\underline{H}_U(j\omega)| = 1. \quad (1)$$

Из этого комплексного соотношения вытекают два вещественных:

$$|\underline{\beta}_U(j\omega)| \cdot |\underline{H}_U(j\omega)| = 1 \quad (2)$$

$$\varphi_\beta(\omega) + \varphi_H(\omega) = 0, 2\pi, 4\pi, \dots \quad (3)$$

Уравнение (2) называют условием баланса амплитуд, а (3) – условием баланса фаз. Баланс амплитуд означает, что незатухающие колебания при замкнутой петле обратной связи могут существовать только тогда, когда усилитель компенсирует потери энергии в этой петле. Условие баланса фаз означает, что восполнение энергии в системе производится в такт ее собственным колебаниям.

Анализ полученных условий стационарных колебаний позволяет установить условия возникновения и последующего нарастания амплитуды колебаний на стадии возбуждения автогенератора:

$$\left. \begin{aligned} \beta_U(j\omega) \cdot H_U(j\omega) &\geq 1; \\ |\beta_U(j\omega)| \cdot |H_U(j\omega)| &\geq 1; \\ \varphi_\beta(\omega) + \varphi_H(\omega) &= 0, 2\pi, 4\pi, \dots \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Отсюда следует, что автогенератор - нелинейное устройство, параметры которого зависят от амплитуды колебаний.

Когда условия самовозбуждения выполняются только на одной частоте  $f_1$ , генерируются гармонические колебания с частотой  $f_1$ . Если условия выполняются на нескольких частотах, то генерируются негармонические колебания, спектр которых образуют гармонические составляющие с этими частотами.

## 2. Автогенератор периодических колебаний прямоугольной формы

Схема генератора прямоугольных импульсов на операционном усилителе (ОУ) представлена на рис. 2, где напряжение узла 2 подается на «прямой» вход ОУ, а напряжение узла 1 – на «инверсный» вход. Разность этих напряжений определяет входное дифференциальное напряжение  $u_{\text{вх.диф}}(t) = u_2(t) - u_1(t)$ , которое считается «полезным» и передается на выход с большим усилением ( $K_{U \text{ диф}} \geq 10^5$ ). Усилитель имеет двуполярное питание, то есть от двух источников постоянного напряжения:  $V_1 = +12 \text{ В}$  и  $V_2 = -12 \text{ В}$ . Величину напряжения этих источников для краткости будем обозначать  $E_\Pi$ .

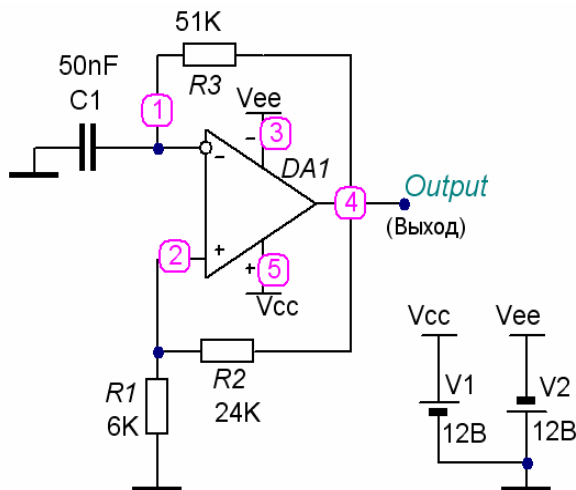


Рис. 2. Схема генератора прямоугольных импульсов на операционном усилителе

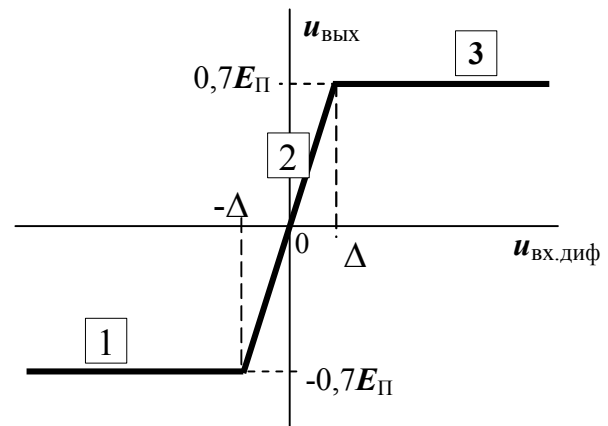


Рис. 3. Передаточная характеристика операционного усилителя

Передаточная характеристика ОУ приведена на рис. 3, где  $\Delta \leq 0,5 \text{ мВ}$  и отмечены три линейных участка. Участки 1 и 3 соответствуют режиму насыщения транзисторов выходного каскада ОУ, когда изменение  $u_{\text{вх.диф}}(t)$  не вызывает изменения  $u_{\text{вых}}(t)$ , имеющего величину  $0,7E_\Pi$  или  $-0,7E_\Pi$ . Участок 2 соответствует режиму усиления

дифференциального входного напряжения, когда любое приращение  $\pm \Delta u_{\text{вх.диф}}$  вызывает пропорциональное приращение  $\pm \Delta u_{\text{вых}} = K_{U \text{ диф}} \cdot (\pm \Delta u_{\text{вх.диф}})$ .

Временные диаграммы колебаний напряжений в автогенераторе изображены на рис. 4. Видим, что напряжения на элементах автогенератора изменяются периодически (период  $T$ ).

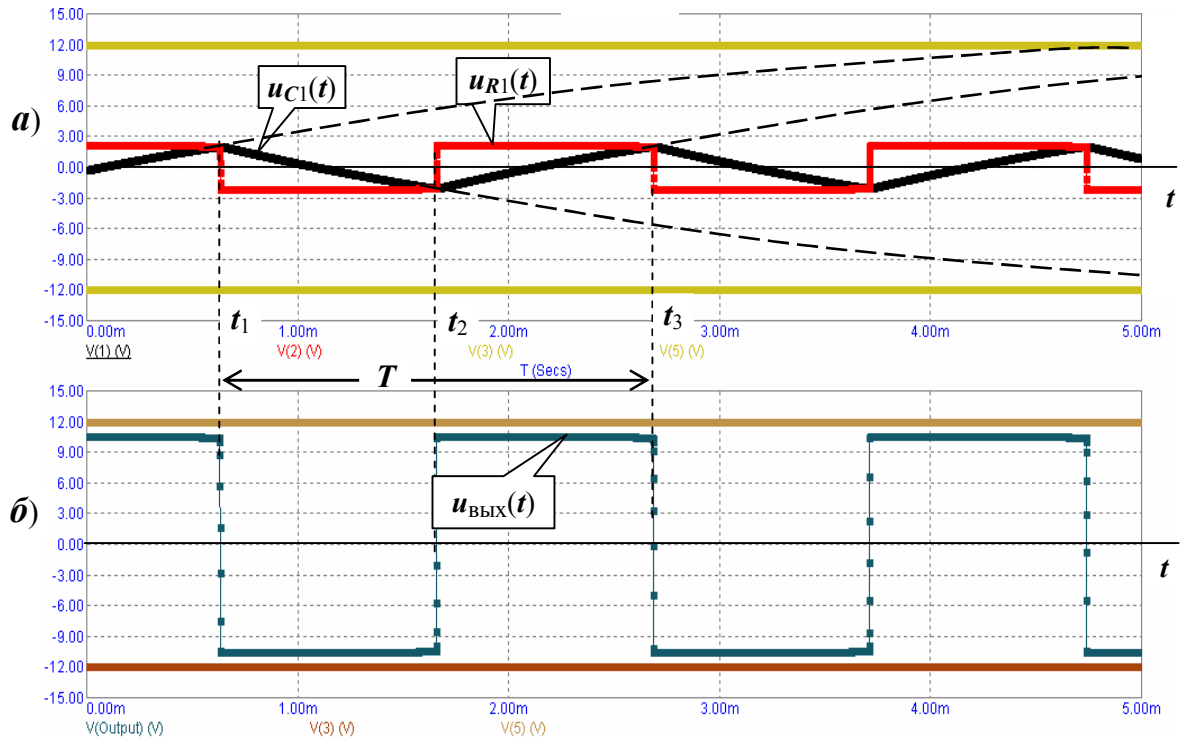


Рис. 4. Временные диаграммы процессов в генераторе импульсов на ОУ

Цепь обратной связи (рис.2) образует делитель выходного напряжения из активных сопротивлений  $R_2$  и  $R_1$ , который не создает фазового сдвига. Напряжение с сопротивления  $R_1$  подается на прямой вход ОУ и, следовательно, напряжение на выходе совпадает по фазе с входным напряжением. Поэтому в промежутки времени, когда рабочая точка находится на участке 2, в генераторе действует петля положительной обратной связи, где выполняются условия самовозбуждения сразу на многих частотах, а коэффициент петлевой передачи

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot K_{U \text{ диф}} > 5 \cdot 10^3.$$

Возникает лавинообразный процесс, способствующий **быстрому** перемещению рабочей точки по участку 2 передаточной характеристики с одного горизонтального участка этой характеристики на другой. Цепочка  $R_3 C_1$  не оказывает влияния на процесс переключения, так как постоянная времени  $\tau = R_3 C_1$  значительно больше времени переключения и напряжение узла 1 (напряжение на конденсаторе  $C_1$ ) остается практически неизменным.

После завершения отмеченного переключения рабочая точка ОУ оказывается на участке 1 (или 3) передаточной характеристики, транзистор выходного каскада ОУ входит в насыщение, усиление дифференциального входного напряжения прекращается. Петля положительной обратной связи разрывается, прекращается генерация, начинается процесс перезаряда конденсатора  $C_1$  по цепи: «плюс» источника питания  $V_{\text{сс}}$  (или  $V_{\text{ее}}$ ), насыщенный транзистор выходного каскада, резистор  $R_3$ , конденсатора  $C_1$ , шина «корпус», второй полюс источника.

Проведем исследование режима работы автогенератора, используя *Transient Analysis*. Окно задания исходных данных представлено на рис. 5, диаграммы колебаний напряжений в автогенераторе изображены на рис. 4.

Видим, что напряжения на элементах автогенератора изменяются периодически (период  $T$ ). Кроме напряжения  $u_{\text{ВЫХ}}(t)$  в виде прямоугольных импульсов на выходе автогенератора, на рис.4, б показаны (светлые линии) нулевой уровень и уровни источников положительного  $V1$  и отрицательного  $V2$  постоянных напряжений. На рис. 4, а выведено напряжение  $u_{R1}(t)$  (красный график) на «прямом» входе ОУ, которое равно

$$u_{R1}(t) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot u_{\text{ВЫХ}}(t)$$

и, следовательно, повторяет форму выходного напряжения. Напряжение  $u_{C1}(t)$  на «инверсном» входе ОУ имеет пилообразную форму (синий график), так как емкость заряжается и перезаряжается через активное сопротивление (по экспоненте).

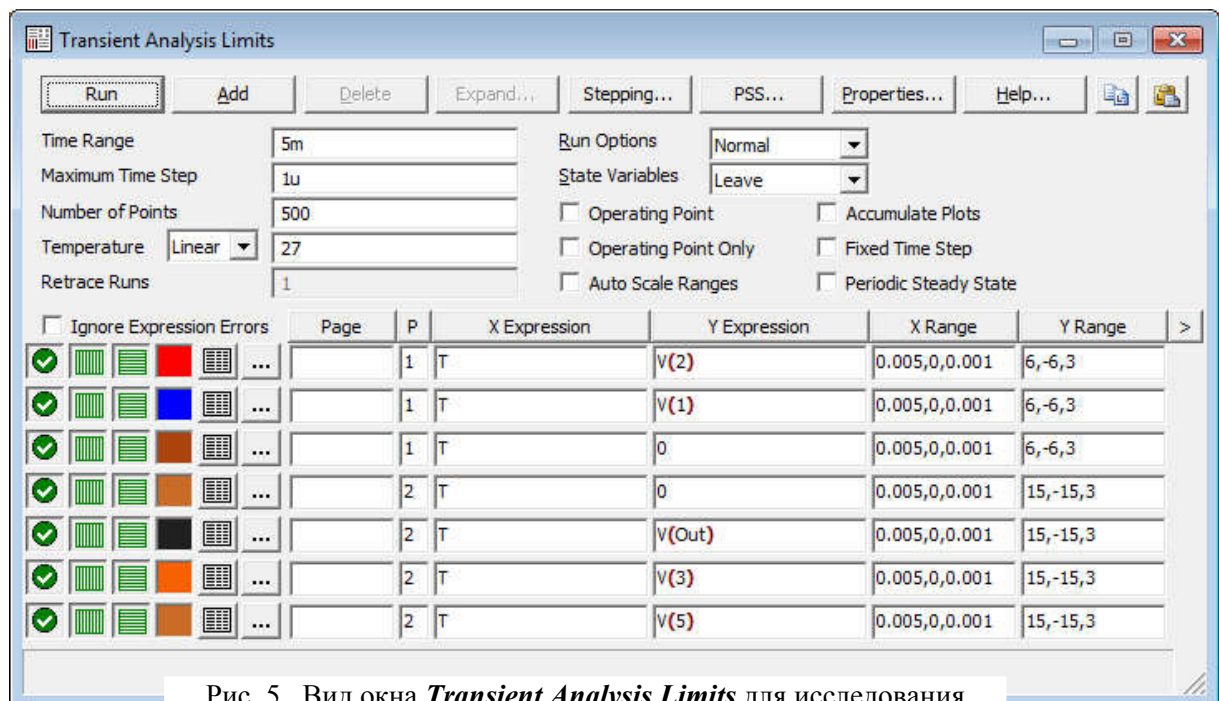


Рис. 5. Вид окна *Transient Analysis Limits* для исследования автогенератора прямоугольных импульсов на ОУ

Напомним, что

$$u_{\text{ВХ диф}}(t) = u_2(t) - u_1(t) = u_{R1}(t) - u_{C1}(t).$$

В середине интервала времени, предшествующего моменту  $t_1$ , напряжение  $u_{\text{ВХ диф}}(t)$  имеет отрицательное значение  $u_{\text{ВХ диф}}(t) < -V_{\text{гр}} = -\Delta$ . Поэтому рабочая точка ОУ находится на участке 3 передаточной характеристики (рис. 3), в выходном каскаде ОУ насыщен транзистор, подключенный к источнику питания с отрицательным напряжением  $V2$ , петля положительной обратной связи не действует. Конденсатор  $C1$  перезаряжается через резистор  $R_3$ , напряжение  $u_{C1}(t)$  стремится к значению  $V2 = -12$  В. Постепенно  $u_{C1}(t)$  приближается (см. рис. 4, а) к уровню напряжения  $u_{R1}(t) = -2,5$  В (красный график). Рабочая точка перемещается по участку 3 передаточной характеристики (рис. 3) вправо, так как напряжение  $u_{\text{ВХ диф}}(t)$  уменьшается по абсолютной величине (разность между красным и синим графиками). В момент  $t_1$ , когда  $u_{\text{ВХ диф}}(t) \geq -V_{\text{гр}} = -\Delta$ , рабочая точка переходит границу между участками 3 и 2. транзистор выходного каскада выходит из насыщения, начинает действовать положи-

тельная обратная связь и развиваться лавинообразный процесс, о котором было сказано выше. В результате происходит весьма быстрое перемещение рабочей точки по участку **2** на участок **1**. В выходном каскаде ОУ в насыщение входит другой транзистор, подключенный к источнику  $V_1 = +12$  В, напряжение на выходе ОУ  $u_{\text{вых}}(t)$  резко увеличиваются до уровня  $+0,7E_{\text{п}}$ . Вследствие этого, напряжение  $u_{R1}(t)$  на «прямом» входе ОУ тоже быстро увеличивается, до величины  $+2,5$  В. Поскольку напряжение на емкости, равное к моменту переключения  $u_{C1}(t_1) = -2,5$  В, не успевает измениться, так же резко увеличивается до  $+5$  В напряжение  $u_{\text{вх диф}}(t)$ . Рабочая точка «забрасывается» далеко вправо по участку **1** передаточной характеристики.

В интервале времени  $t_1 < t < t_2$  происходит перезаряд конденсатора  $C_1$ , причем ток через него протекает в другом направлении (от «плюса» источника  $V_1$ ), а напряжение на конденсаторе  $C_1$  стремится к  $V_1 = 12$  В. Постепенно  $u_{C1}(t)$  приближается к уровню напряжения  $u_{R1}(t) = +2,5$  В.  $u_{\text{вх диф}}(t)$  уменьшается, рабочая точка движется влево по участку **1** к границе с участком **2**. В момент  $t_2$ , когда  $u_{\text{вх диф}}(t_2) \geq +V_{\text{гр}} = +\Delta$ , рабочая точка переходит на участок **2**, и снова начинается лавинообразный процесс переключения, в результате которого рабочая точка «забрасывается» влево на участке **3**. Затем все повторяется.

Период колебаний выходного напряжения определяется выражением

$$T = 2 \cdot R_3 C_1 \cdot \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right).$$

### 3. Автогенератор гармонических колебаний на ОУ

В низкочастотных генераторах гармонических колебаний широко используется автогенератор с мостом Вина (рис. 6). В состав автогенератора входит неинвертирующий усилитель (обведен пунктирными линиями), содержащий операционный усилитель (ОУ) с элементами нелинейной отрицательной обратной связи  $R_4$ ,  $R_3$  и  $R_5$  с диодами  $VD1, VD2$ .

Эти элементы составляют два плеча моста Вина. Еще два плеча моста ( $C_1$  и  $R_1$ ,  $C_2$  и  $R_2$ ) образуют цепь обратной связи автогенератора, которая подключена к «прямому» входу усилителя в узле 3.

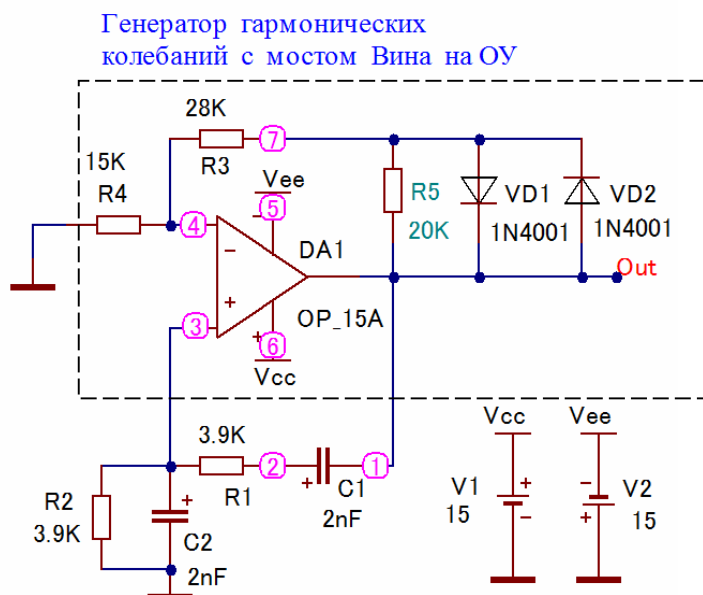


Рис. 6. Схема автогенератора на ОУ

На рис. 7 эта цепь представлена отдельно для исследования частотных характеристик в режиме *AC Analysis*, а результаты анализа приведены на рис. 8: на верхнем графике (красным цветом) модуль коэффициента передачи  $|B_U(f)|$  – АЧХ, и на нижнем графике ФЧХ – зависимость от частоты фазового сдвига  $\varphi_{OC}(f)$ . С помощью курсоров (включаются пятой пиктограммой слева) отмечены максимум  $|B_U(f_0)| = 0,3333$ , а на ФЧХ – точка с нулевой фазой на частоте  $f_0 = 20.417$  кГц. На других частотах фазовый сдвиг  $\varphi_{OC}$  отличается от нуля и  $|\varphi_{OC}|$  меньше  $100^\circ$ .

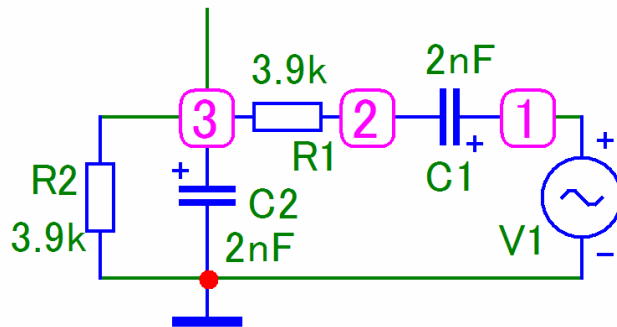


Рис.7. Схема цепи обратной связи автогенератора на операционном усилителе (ОУ) с мостом Вина

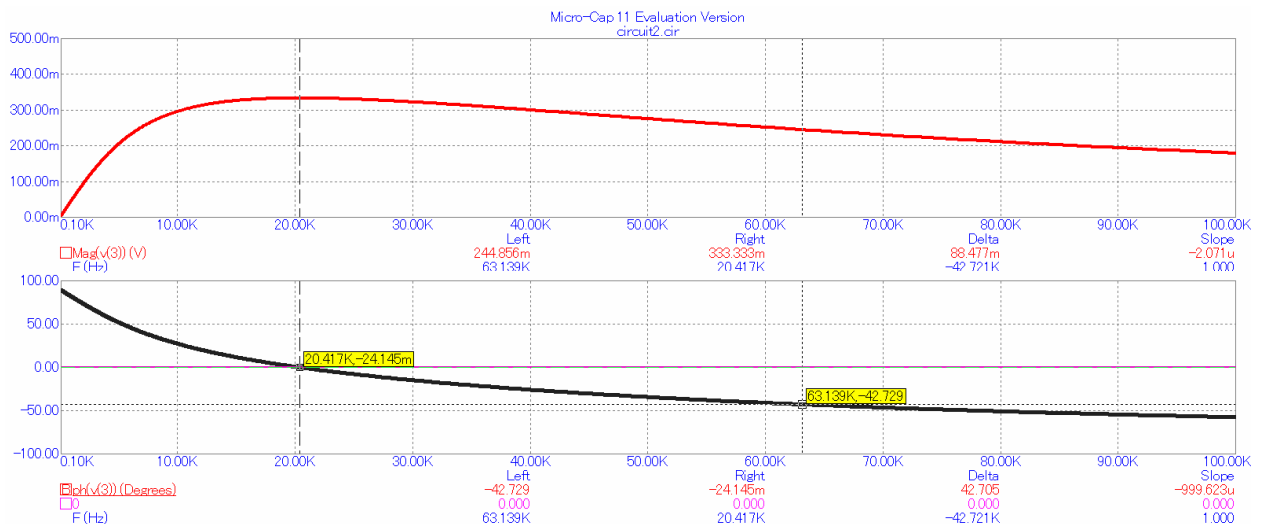


Рис. 8. Частотные характеристики цепи обратной связи в виде полосового *RC*-фильтра из элементов  $C_1$  и  $R_1$ ,  $C_2$  и  $R_2$ , входящего в состав моста Вина

Следовательно, генерирование колебаний возможно только на отмеченной частоте

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 R_1 C_2 R_2}}.$$

Однако, для выполнения условия баланса фаз

$$\varphi_{общ}(f_0) = \varphi_{OC}(f_0) + \varphi_{yc}(f_0) = 0$$

необходимо, обеспечить  $\varphi_{yc}(f_0) = 0$ . То есть фазовый сдвиг в усилителе на частоте  $f_0$  должен быть равен нулю.

Поэтому в качестве усилителя используется неинвертирующий усилитель на основе ОУ с коэффициентом передачи  $H_U = \left(1 + \frac{R_3 + R_5}{R_4}\right) \geq 3$ .

Поскольку  $[B_U(f_0)] = 0,3333$ , это обеспечит выполнение условия баланса амплитуд  $[H_U(f_0)] \cdot [B_U(f_0)] \geq 1$ .

Ввиду того, что на всех иных частотах  $\Phi_{OC}$  отличается от нуля, генерация возможна только на одной частоте  $f_0$  и форма генерируемых колебаний будет гармонической.

Исследуем работу автогенератора, представленного на рис.6. Включаем *Transient Analysis (Alt +1)*, появляется окно ввода параметров анализа (рис. 9).

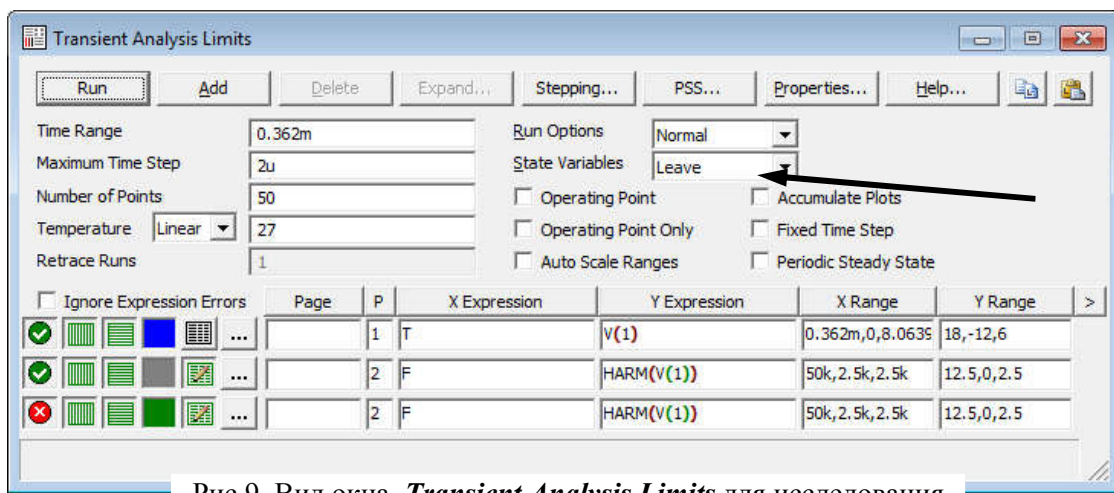


Рис.9. Вид окна *Transient Analysis Limits* для исследования автогенератора на ОУ с мостом Вина

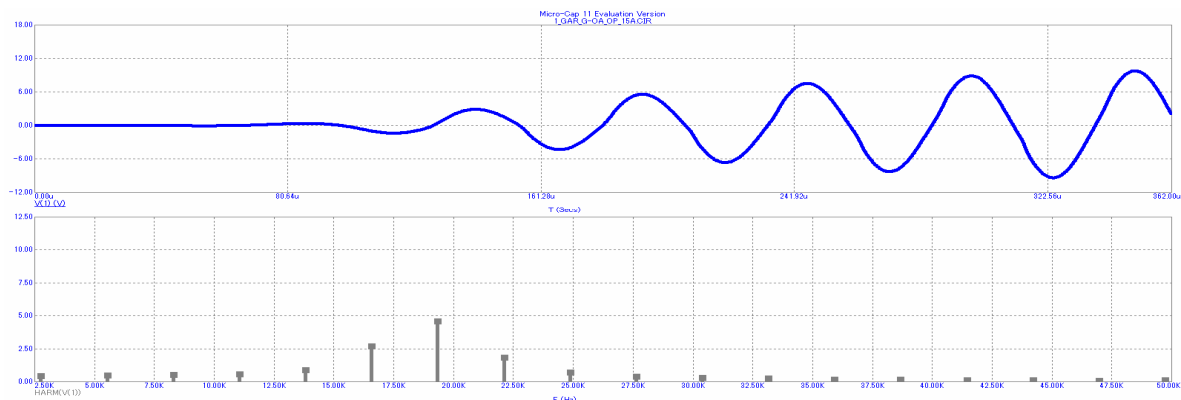


Рис.10. Напряжение на выходе автогенератора на ОУ с мостом Вина и спектр этого напряжения после первого запуска режима анализа

Результаты анализа представлены на рис. 10 и рис. 11, где спектр состоит из одной гармоники с частотой  $f_r = 19,357$  кГц, что подтверждает сделанные выше выводы о форме колебаний.

Различие частот  $f_r$  и  $f_0$  объясняется наличием диодов *VD1* и *VD2*, которые введены в схему для стабилизации амплитуды колебаний, но, как видим, обуславливают дополнитель-

ный фазовый сдвиг в усилителе автогенератора по сравнению с идеальным неинвертирующим усилителем.

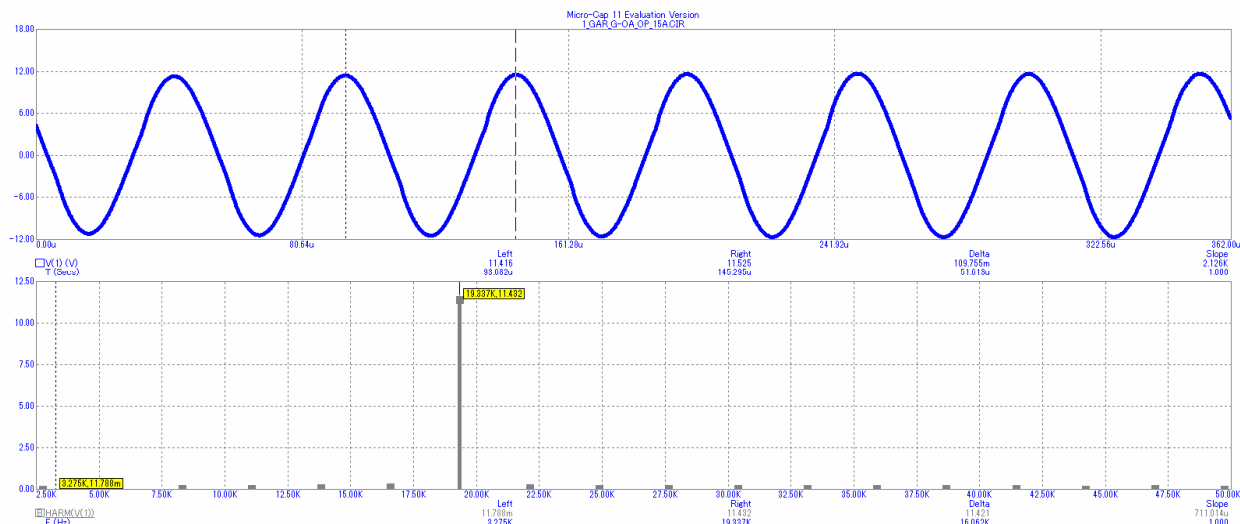


Рис.11. Напряжение на выходе автогенератора на ОУ с мостом Вина и спектр этого напряжения после четвертого запуска режима анализа

#### 4. Автогенератор гармонических колебаний по схеме «индуктивная трехточка»

Автогенератор, схема которого представлена в левой части рис. 12, содержит усилитель на биполярном транзисторе, выполненный по схеме с общим эмиттером с параллельным питанием коллекторной цепи. Постоянная составляющая тока коллектора проходит через дроссель с большой индуктивностью  $L_1$  и источник питания  $V_1$ , а переменная составляющая – через нагрузку усилителя в виде параллельного колебательного контура из  $L_1$ ,  $C_1$  и  $C_2$  на «корпус». Контур имеет две емкости и подключен в схему тремя точками **1**, **2** и «корпус». Отсюда – название схемы автогенератора.

Напряжение узла **1** через разделительный конденсатор  $C_5$  большой емкости передается на резистор  $R_5$ , имитирующий эквивалентное входное сопротивление цепей, которые будут подключаться к выходу автогенератора.

Напряжение узла **2** через конденсатор  $C_3$  большой емкости передается на базу транзистора, и петля обратной связи замыкается. Отметим, что  $u_B(t) = u_2(t)$ .

Известно, что переменная составляющая тока коллектора совпадает по фазе с переменным напряжением на базе  $u_B(t)$ , а переменное напряжение на коллекторе (относительно

«корпуса») при чисто активной нагрузке изменяется в противофазе с током, то есть сдвинуто на  $180^\circ$ . Если переменная составляющая тока коллектора будет изменяться с резонансной частотой контура, эквивалентное сопротивление контура будет чисто активным, и напряжение узла 1 (напряжение на емкости  $C_1$ ) сдвинуто по фазе на  $180^\circ$  относительно напряжения на базе  $u_B(t)$ .

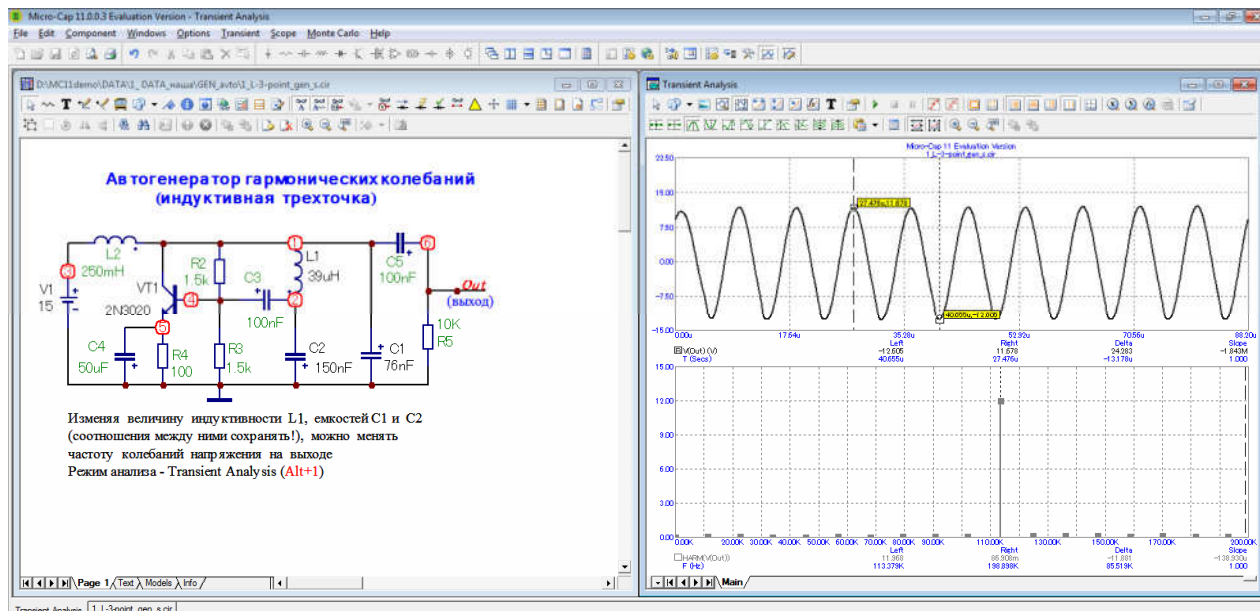


Рис. 12. Схема и графики процессов в автогенераторе гармонических колебаний типа «индуктивная трехточка»

При резонансе внутри колебательного контура протекает контурный ток, существенно превышающий переменную составляющую тока коллектора. Этот ток создает напряжение на емкостях  $C_1$  и  $C_2$ . Полярность напряжений указана на схеме.

Поскольку напряжение узла 2 определяется напряжением на емкости  $C_2$ , а именно,  $u_2(t) = -u_{C2}(t)$ , оно сдвинуто на  $180^\circ$  относительно напряжения  $u_1(t)$  узла 1 и на  $360^\circ$  относительно напряжения на базе. Иначе говоря,  $u_2(t) = u_B(t)$ , что подтверждает возможность обеспечения баланса фаз на резонансной частоте контура

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}.$$

Баланс амплитуд легко обеспечивается при достаточно высокой (более 10) добротности контура.

Следовательно, в автогенераторе по схеме «индуктивная трехточка» возможна генерация колебаний только при резонансе контура, так как на все прочих частотах эквивалентное сопротивление контура будет иметь комплексный характер и условие баланса фаз не выполнится.

В правой части рис. 12 приведены график колебаний напряжения на выходе автогенератора и спектр этих колебаний, подтверждающие их гармоническую форму.

## 5. Автогенератор периодических колебаний прямоугольной формы на КМОП-инверторах

Схема генератора прямоугольных импульсов на основе логических инверторов с КМОП структурой, представленная на рис. 13, содержит три инвертора на полевых транзисторах с изолированным затвором (структура металл-окисел-полупроводник, сокращенно МОП) и индуцированным каналом (канал обозначен пунктиром). Транзисторы в инверторе (например, VT1 и VT2) образуют комплементарную пару (буква «К» в названии), т.к. имеют одинаковые числовые значения параметров, но различные типы каналов. У верхнего транзистора индуцируется  $p$ -канал, а у нижнего - канал  $n$ -типа.

Источник питания V1 вырабатывает напряжение величиной 6 В, которое далее будем именовать  $E_{\Pi}$ . Следует заметить, что собственно автогенератор создают два инвертора на транзисторах VT1 и VT2, и на транзисторах VT3 и VT4. Инвертор на транзисторах VT5 и VT6, обеспечивая развязку от последующих логических элементов и улучшая прямоугольность импульсов. Входные токи затворов транзисторов при структурах МОП пренебрежимо малы (это токи заряда маленьких емкостей между выводами). Поэтому напряжение узла 6 полностью передается через сопротивление  $R_1$  на затворы транзисторов VT1 и VT2 первого инвертора.

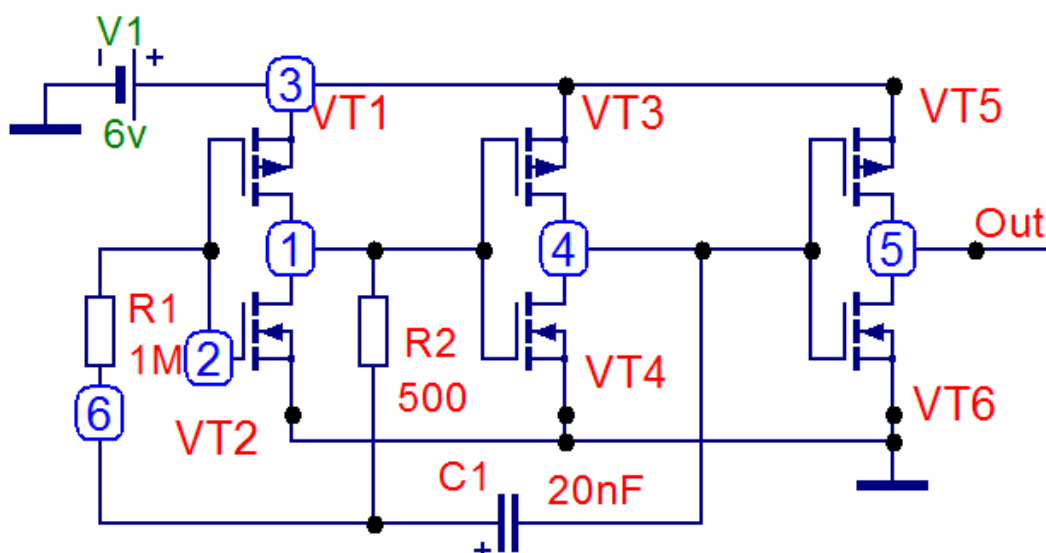


Рис.13. Схема автогенератора на логических инверторах (структура КМОП)

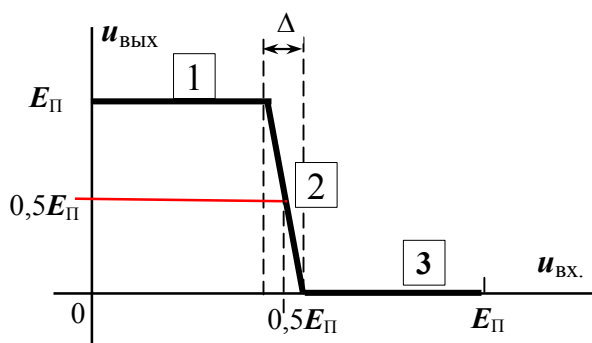


Рис. 14. Передаточная характеристика КМОП - инвертора

На рис. 14 приведена передаточная характеристика инвертора, где отмечены три линейных участка. Участок 1 соответствует режиму, когда верхний транзистор имеет полностью открытый канал, а нижний транзистор заперт. Участок 3 соответствует противоположному режиму: нижний транзистор имеет полностью открытый канал, а верхний транзистор заперт. В случае, когда рабочая точка, характеризующая режим инвертора, находится на участке 2, **инвертор работает, как усилитель**: оба транзистора находятся в активном состоянии, изменение  $u_{ВХ}(t)$  вызывает изменения  $u_{ВЫХ}(t)$ ,

Участок 2 (область переключения инвертора) соответствует узкой зоне значений входного напряжения  $(E_{II} - 0,5 \cdot \Delta) < u_{BX} < (E_{II} + 0,5 \cdot \Delta)$ , причем  $\Delta < 20$  мВ. Крутизна участка 2 определяет величину коэффициента передачи (усиления) инвертора  $K_U = \frac{E_{II}}{\Delta} \gg 1$ .

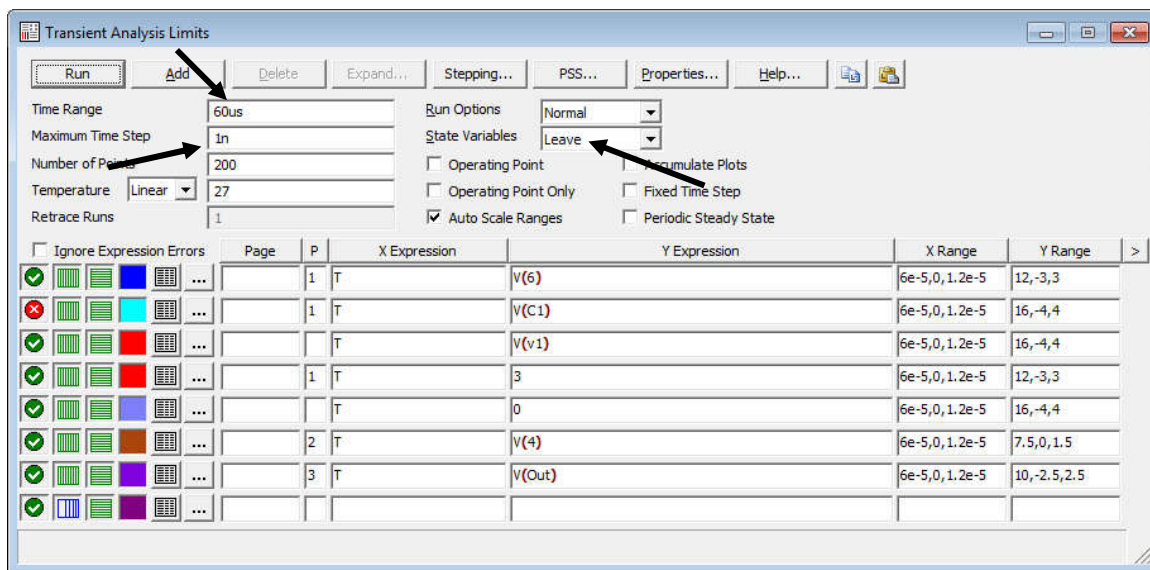


Рис.15. Вид окна *Transient Analysis Limits* для исследования автогенератора на КМОП инверторах

Для исследования работы автогенератора (рис. 13) включаем *Transient Analysis (Alt +1)*, Появляется окно ввода параметров анализа (рис. 15).

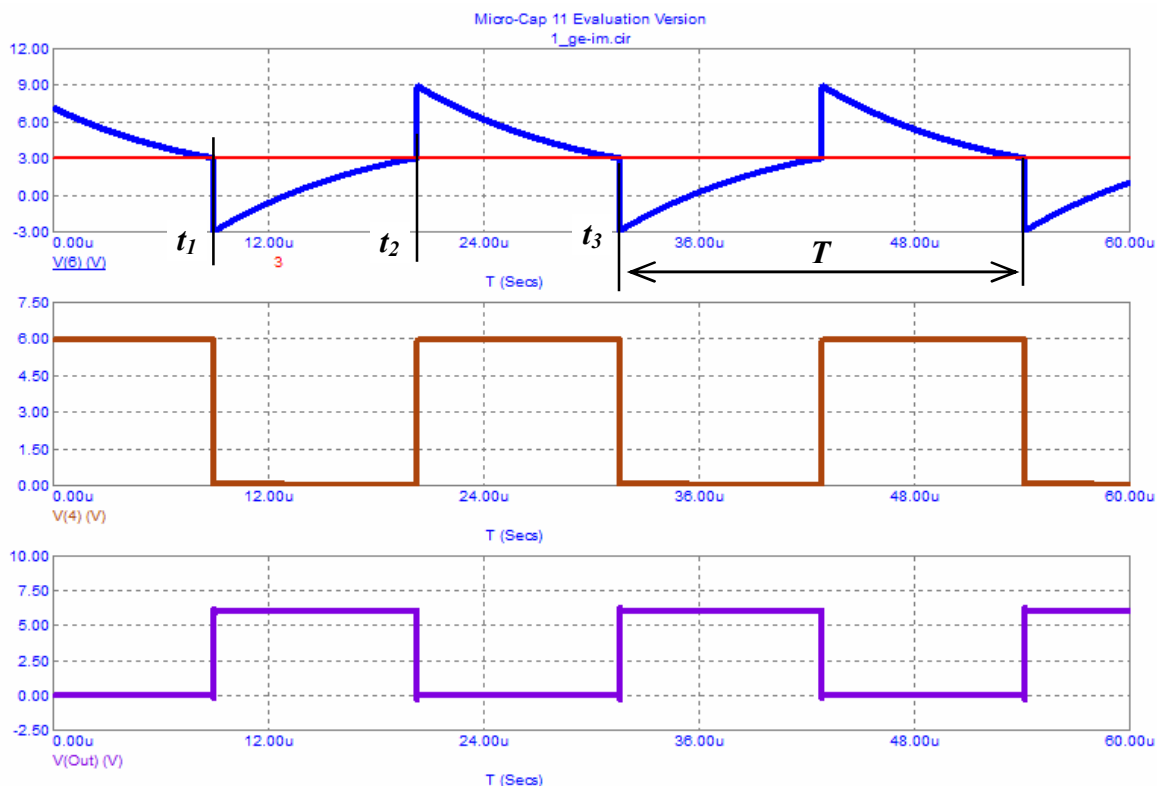


Рис.16. Временные диаграммы процессов в автогенераторе импульсов на КМОП инверторах

Результаты моделирования работы автогенератора представлены на рис. 16, где на верхнем графике красным цветом отмечен постоянный уровень напряжения  $0,5E_{\Pi}$ , а синим цветом - траектория изменения напряжения узла 6 (напряжения узла 2 - входа первого инвертора). На среднем графике (коричневым цветом) и на нижнем графике (фиолетовым цветом) показаны импульсные напряжения на выходах второго (узел 4) и третьего (узел 5) инверторов соответственно.

Разберем процессы, происходящие в автогенераторе. В интервале времени, предшествующем моменту  $t_1$ , напряжение на входе первого инвертора выше уровня  $0,5E_{\Pi}$ , следовательно, рабочая точка этого инвертора находится на участке 3 передаточной характеристики (рис. 14), верхний транзистор VT1 первого инвертора и нижний транзистор VT4 второго инвертора заперты. Напряжение узла 4 почти равно  $E_{\Pi}$ , т.к. в транзисторе VT3 индуцирован канал проводимости. В транзисторе VT2 тоже индуцирован канал проводимости, и потому выход первого инвертора (узел 1) соединен с корпусом и имеет весьма низкий потенциал.

Ток в этом временном интервале протекает по пути: от «плюса» источника V1 через транзистор VT3 (от истока к стоку), через конденсатор  $C_1$ , перезаряжая его до напряжения отрицательной полярности, по сопротивлению  $R_2$  от узла 6 к узлу 1, через транзистор VT2 на корпус и «минус» источника V1. Напряжение на сопротивлении  $R_2$  положительной полярности, которое в этом интервале определяет потенциал узла 6, выше уровня  $0,5E_{\Pi}$ , и по мере перезаряда конденсатора постепенно уменьшается. Процесс идет относительно медленно. Рабочая точка первого инвертора движется влево по участку 3, приближаясь к границе с участком 2. Когда рабочая точка перейдет эту границу, очень малые отрицательные приращения на сопротивлении  $R_2$  вызовут существенные положительные приращения напряжения на выходе первого и на входе второго инверторов (узел 1), так как первый инвертор заработает как усилитель. Напряжение на выходе первого инвертора быстро достигает уровня  $0,5E_{\Pi}$  (красная линия). При этом рабочая точка второго инвертора быстро продвигается по участку 1 передаточной характеристики от вертикальной оси до границы с участком 2 и заходит на него.

Тогда начинает действовать петля положительной обратной связи, которая образуется первым и вторым инверторами, конденсатором  $C_1$  и резистором  $R_1$ . Каждый инвертор осуществляет сдвиг сигнала, циркулирующего по петле, по фазе на  $180^\circ$ , коэффициент передачи по петле существенно больше единицы, а конденсатор не оказывает никакого влияния (не создает сдвига фазы) на прохождение сигнала, так как напряжение на нем не успевает измениться за время переключения. Условия самовозбуждения выполняются одновременно на многих частотах. Возникает лавинообразный кратковременный процесс, при котором рабочие точки инверторов, очень быстро двигаются по участкам 2 (поднимается у первого инвертора и скатывается у второго) и оказываются на горизонтальных участках 1 и 3 соответственно. Лавинный процесс прекращается, транзисторы инверторов переключаются в «квазистатические» состояния, петля положительной обратной связи разрывается. Начинается очередной цикл перезаряда емкости конденсатора. Отметим, что в течение лавинообразного процесса формируются фронты и срезы выходных прямоугольных импульсов (средний и нижний графики рис. 16)

В интервале времени  $t \in (t_1; t_2)$  транзисторы заперты, а транзисторы имеют индуцированные каналы. Образуется путь для тока перезаряда конденсатора до напряжения положительной полярности: от «плюса» источника V1 через транзистор VT1 (от истока к стоку), резистор  $R_2$  от узла 1 к узлу 6, через конденсатор  $C_1$ , через транзистор VT4 на корпус и «минус» источника V1. В этом интервале потенциал узла 6 определяет напряжение на конденсаторе  $C_1$  (он подключен левым выводом к корпусу). К моменту переключения  $t_1$  оно имело величину  $u_{C1}(t_1) = -0,5E_{\Pi}$ . Поэтому в процессе переключения потенциал узла 6 очень бы-

стро падает до отрицательного уровня  $-0,5E_{\Pi}$  (см. рис.16). Затем при разряде и перезаряде конденсатора  $C_1$  потенциал узла 6 начинает увеличиваться, стремясь к уровню  $+E_{\Pi}$ . Рабочая точка на характеристике первого инвертора находится на первом участке и относительно медленно движется вправо к границе с участком 2. Рабочая точка второго инвертора находится неподвижно в правом краю участка 3 своей передаточной характеристики, так как напряжение узла 1, равное  $E_{\Pi}$ , не изменяется.

В интервале времени  $t \in (t_1; t_2]$  напряжение на конденсаторе  $C_1$  определяется так

$$u_{C1}(t) = E_{\Pi} \cdot \left[ 1 - 1,5 \cdot \exp\left(-\frac{t-t_1}{R_2 C_1}\right) \right].$$

В момент  $t_2$ , когда напряжение на конденсаторе (и потенциал узла 6) достигнет уровня  $0,5E_{\Pi}$ , произойдет очередное переключение транзисторов. Следовательно,

$$u_{C1}(t_2) = E_{\Pi} \cdot \left[ 1 - 1,5 \cdot \exp\left(-\frac{t_2-t_1}{R_2 C_1}\right) \right] = 0,5 \cdot E_{\Pi}.$$

Решив уравнение, находим длительность интервала  $t \in (t_1; t_2]$ :  $t_2 - t_1 = 1,1 \cdot R_2 C_1$ .

Величина интервала определяет длительность генерируемых импульсов и периода, так как генератор, построенный по схеме рис. 13, генерирует меандр (положительные импульсы и промежутки между ними одинаковы)

$$t_{\text{и}} = t_2 - t_1 = 1,1 \cdot R_2 C_1; \quad T = 2(t_2 - t_1) = 2,2 \cdot R_2 C_1.$$

К моменту  $t_2$ , когда напряжение на конденсаторе (и потенциал узла 6) достигнет уровня  $0,5E_{\Pi}$ , рабочая точка на передаточной характеристике первого инвертора перейдет с 1-го на 2-й участок и начнет по нему спускаться. Уровень, на котором находится эта рабочая точка, определяет напряжение узла 1 в схеме. Поэтому напряжение узла 1 начнет уменьшаться, и рабочая точка второго инвертора станет двигаться влево по участку 3 к границе с участком 2. В момент  $t_2$  рабочая точка первого инвертора спускается до уровня, отмеченного красным на рис.14, а рабочая точка на характеристике второго инвертора переходит на участок 2. Оба инвертора начинают работать в активном режиме (усиливать), замыкается петля положительной обратной связи, генерируется лавинообразный процесс, происходит быстрое переключение транзисторов. Затем петля обратной связи разрывается, так как транзисторы оказываются в квазистатическом состоянии: проводят VT2 и VT3, заперты VT1 и VT4. Заканчивается формирование фронтов и срезов импульсов, начинается очередной интервал перезаряда конденсатора до отрицательных напряжений так, как описано выше до момента  $t_1$ . Рабочие точки попадают на участки 3 и 1 соответственно.

Поскольку в момент  $t_2$  напряжение на конденсаторе  $u_{C1}(t_2) = +0,5E_{\Pi}$ , после открывания транзистора VT3 потенциал узла 6 скачком увеличивается до величины  $1,5E_{\Pi}$ , а потом при перезаряде конденсатора постепенно уменьшается, стремясь к нулю. Однако в момент  $t_3$  этот потенциал достигает уровня  $0,5E_{\Pi}$ , и происходит следующее переключение транзисторов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Цель работы:** изучение схемы и исследование работы

- автогенератора релаксационных колебаний (периодической последовательности прямоугольных импульсов), выполненного на основе операционного усилителя (ОУ);
- автогенератора прямоугольных импульсов на основе логических элементов с КМОП-структурами (КМОП-инверторы);
- автогенератора гармонических колебаний на ОУ с мостом ВИНА;

Выяснение особенностей настройки таких генераторов. Освоение моделирования процессов в электронных устройствах при использовании программного комплекта *MicroCAP*. Все исследования проводятся в компьютерном классе.

### *Указания по порядку выполнения разделов работы*

#### **1. Исследование режима работы автогенератора, выполненного на основе операционного усилителя**

- 1.1. Включить компьютер и вызвать программу *MicroCAP-11*(demo).
- 1.2. Открыть папку «Gen-avto» и открыть файл «1-g-OA.cir».
- 1.3. Проверить правильность схемы автогенератора, включить нумерацию узлов, записать номера узлов, определяющих напряжение на конденсаторе, на неинвертирующем входе ОУ, на выходе. Не изменяя значения параметров остальных элементов, установить значение емкости конденсатора  $C_1$  в соответствии с формулой

$$C_1 = 2 \cdot (\text{номер фамилии студента в списке группы}) [\text{нФ}] \quad (10)$$

Рассчитайте период  $T$  следования импульсов автогенератора по формуле, приведенной выше.

- 1.4. Вызвать режим анализа переходных процессов “*Transient Analysis*” (Alt+1)
- 1.5. После этого программа проверяет правильность составления схемы. При наличии ошибок выводится соответствующее сообщение.
- 1.6. Получив на экране изображение окна *Transient Analysis Limits* (задание параметров моделирования), записать параметры напряжений, временные диаграммы которых Вы желаете получить.  
Установить Time Range в 3-4 раза больше периода  $T$ , а максимальный шаг при расчете – в тысячу раз меньше. Проверьте, сверяя с примером, что установлено в других окошках. Обратите внимание на режим «Leave» (указано стрелкой).

- 1.7. Провести пробный анализ режима, нажав клавишу “F2” или “Run”.

- 1.8. Убедившись, что моделирование выполняется, уточняйте временной диапазон моделирования, цвета графиков, масштабы их и расположение. Для этого вызывайте повторно панель задания параметров моделирования (клавиша “F9”). Сделайте толщину линий на графиках не менее «3»
- 1.9. Провести моделирование процессов при заданных параметрах элементов. Запускайте анализ несколько раз, что режим установился. Измерить амплитуду, длительность импульсов, период следования их. Сравните с рассчитанным значением. Используйте курсоры.
- 1.10. Скопировать схему и временные диаграммы и поместить в отчет.

## 2. Исследование автогенератора прямоугольных импульсов на логических элементах с КМОП-структурами

- 2.1. Открыть папку «Gen-avto» и открыть файл «1-ge-im.cir».
- 2.2. Проверить правильность схемы автогенератора, включить нумерацию узлов, записать номера узлов, определяющих напряжение на конденсаторе, на выходах логических элементов.
- 2.3. Значение емкости  $C_1$  рассчитать по той же формуле.
- 2.4. Вызвать режим расчета переходных процессов “*Transient Analysis*” (*Alt+I*)
- 2.5. Дальнейшие исследования работы автогенератора проводятся так же, как генератора на ОУ в разделе 1.

## 3. Исследование автогенератора гармонических колебаний на ОУ с мостом ВИА

- 3.1. Открыть папку «Gen-avto»,  
открыть файл «1\_GAR\_G-OA\_OP\_15A.cir» или другой с аналогичным названием «1\_GAR\_G-OA\_\_\_\_\_».
- 3.2. Изменить параметры элементов по указанию преподавателя, Не изменяя значения параметров остальных элементов, установить значение емкостей и сопротивлений в соответствии с формулами
 
$$C_1 = C_2 = 1.5 \cdot (\text{номер фамилии студента в списке группы}) \text{ [нФ];}$$

$$R_1 = R_2 = 3.5 + 0.5 \cdot (\text{номер фамилии студента в списке группы}) \text{ [кОм];}$$
(11)
- 3.3. Рассчитать частоты генерируемых колебаний.
- 3.4. Вызвать режим расчета переходных процессов “*Transient Analysis*” (*Alt+I*)
- 3.5. Получив на экране изображение окна *Transient Analysis Limits* (задание параметров моделирования), записать параметры напряжений, временные диаграммы которых Вы желаете получить.  
Установить Time Range в 6-7 раза больше периода  $T$ , а максимальный шаг при расчете – в тысячу раз меньше. Проверьте, сверяя с примером, что установлено в других окошках. Обратите внимание на режим «Leave» (указано стрелкой).

- 3.6. Запускайте анализ несколько раз до получения установившегося режима
- 3.7. Измерьте период колебаний. Подберите точнее время анализа, чтобы четко укладывалось целое число периодов, для получения четкой одной спектральной линии.
- 3.8. По высоте спектральной линии измерьте амплитуду колебаний
- 3.9. Добиться четкого отображения режимов работы автогенераторов на графиках, измерить частоты автоколебаний

Сделать выводы по работе и сформировать отчет.

Отчет должен содержать:

- ◆ титульный лист с названиями учебного заведения и кафедры, наименованием работы, фамилией автора отчета;
- ◆ цель работы и задание к работе;
- ◆ принципиальную электрическую схему автогенератора;
- ◆ копии временных диаграмм;
- ◆ выводы об особенностях работы генераторов.

### ***КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ***

1. Принцип работы автогенератора и назначение элементов схемы.
2. Сформулировать условия самовозбуждения автогенератора и объяснить их физический смысл. Объяснить, как эти условия обеспечиваются в исследуемом автогенераторе.
3. Когда в автогенераторах импульсов выполняются условия самовозбуждения, а в какие интервалы времени не выполняются и почему?

### *Список литературы*

1. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М.: «Додэка-XXI», 2007. – 528 с., ил.
2. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. – Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. – 617 с.: ил. <http://www.microcap-model.narod.ru>
3. Тылес М.Г. Схемотехническое моделирование электронных и электрических устройств в среде программного комплекта Micro-Cap 11. [Текст]: учебн. пособие. Электронное издание. - Нижний. Новгород, ВВФ МТУСИ, 2019.- 65 с., ил.
4. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования MICRO-CAP. - М.: «Солон», 1997. - 274 с., ил.