

В. Н. Новиков, Н. С. Ульянин, Б. В. Цыпин

МОДЕЛЬ СТАБИЛИЗАЦИИ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

V. N. Novikov, N. S. Ulyanin, B. V. Tsyripin

MODEL OF STABILIZATION OF EDDY CURRENT DISPLACEMENT SENSORS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью работы является разработка модели стабилизации вихретоковых датчиков перемещения в составе схемы электрической принципиальной генератора частоты за счет автоматической регулировки параметров устройства. **Материалы и методы.** Схемотехнические решения отработаны в симуляторе PSpice (MicroCAP). На основе полученных экспериментальных данных разработана модель стабилизации параметров вихретоковых датчиков перемещения с помощью обратной связи в цепи генератора и автоматической регулировки параметров схемы в зависимости от режимов работы устройства. **Результаты.** Рассмотрены канонические схемы генераторов частоты применительно к вихретоковым датчикам перемещения. Определены границы надежного запуска и работы генераторов частоты. Разработана модель генератора частоты на основе дифференциальной схемы усилителя. **Выводы.** Рассмотрены вопросы повышения стабильности частоты генератора при прочих равных условиях, вопросы повышения устойчивости запуска генераторов в режиме автоколебаний, регулирование параметров работы в условиях внешних воздействующих факторов. Проведено моделирование ключевых моментов работы схемы.

A b s t r a c t. Background. The aim of the work is to develop a model of stabilization of eddy current displacement sensors as part of the circuit of the electric fundamental frequency generator by automatically adjusting the parameters of the device. **Materials and methods.** Circuit solutions are worked out in the simulator PSpice (MicroCAP). On the basis of the experimental data obtained, a model for stabilizing the parameters of eddy current displacement sensors by means of feedback in the generator circuit and automatic adjustment of the circuit parameters depending on the operating modes of the device is developed. **Results.** Canonical schemes of frequency generators in relation to eddy current displacement sensors are considered. Limits of reliable start and operation of frequency generators are defined. A model of the frequency generator based on the differential circuit of the amplifier is developed. **Summary.** Considered to improve frequency stability of the generator, ceteris paribus, improving the stability of running of generators in self-oscillation mode, adjustment of parameters of work in terms of external influencing factors. The modeling of the key points of the scheme is carried out.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вихретоковый датчик, перемещение, автогенератор, устойчивость запуска, стабильность, автоматическая регулировка.

К e y w o r d s: eddy current sensor, a displacement oscillator, the stability of the launch, stability and automatic adjustment.

Введение

Несмотря на значительные результаты, достигнутые в области построения вихретоковых датчиков перемещения [1], дальнейшее улучшение их характеристик традиционными ме-

тодами с использованием известных конструктивных решений, материалов и технологий ограничен [2]. Необходим поиск новых элегантных решений.

Преимущества цифровой формы сигнала и передачи информации определяют целенаправленную реализацию цифровых решений [3]. Современное развитие цифровой техники позволяет предположить, что физические величины или их изменение будут преобразовываться непосредственно в цифровой код, что упрощает конструкцию преобразователя по сравнению с аналоговыми решениями [4]. Такая цифровая концепция предполагает поиск новых технических решений, позволяющих не только повысить точность преобразования физических величин, но и получить на выходе цифровой сигнал.

К одной из форм цифрового сигнала можно отнести переменные сигналы различной частоты, где учитывается не уровень сигнала, а его частота или период. Согласно исследованиям [5] частотная модуляция позволяет получить большее число четко различимых градаций измеряемого процесса, чем в измерениях уровня сигнала при амплитудной модуляции [6].

Наличие высокоточных мер времени является существенным преимуществом при измерениях частоты и периода сигнала в сравнении со сложностью реализации прецизионных источников опорного напряжения и относительными измерениями уровня сигнала средствами аналого-цифровых преобразователей.

Основная часть

Вид модуляции переменного сигнала определяется принципом измеряемого процесса. В вихретоковых датчиках перемещения измеряемая величина по физической сущности является переменной индуктивностью. Логично использовать изменение индуктивности колебательного контура для частотной модуляции сигнала.

Вихретоковые датчики перемещения работают на изменении индуктивности при изменении зазора между катушкой и ответной проводящей мишенью. На рис. 1 приведена зависимость индуктивности от перемещения, данные получены в результате измерений.

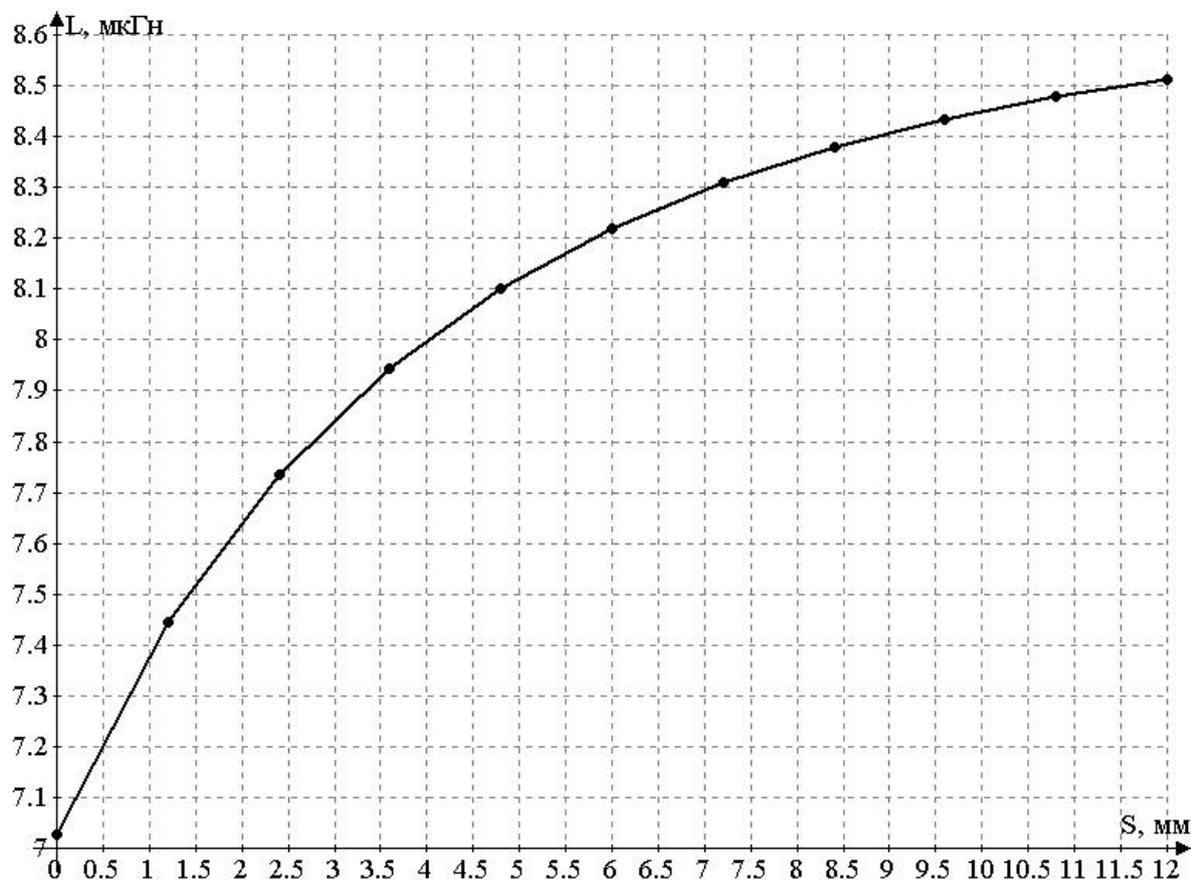


Рис. 1. Зависимость индуктивности L от перемещения S

Основным элементом для преобразования изменения индуктивности в частоту является генератор. Генератор преобразовывает энергию источников питания в энергию электромагнитных колебаний.

Основными элементами генератора являются: электронный модулятор тока (транзистор), колебательная система (колебательный контур), источник энергии.

Автоколебательные системы способны совершать колебания, амплитуда которых в течение долгого времени остается неизменной. Признаком автогенераторов является наличие положительной обратной связи выходного сигнала с входными цепями. Часть выходной высокочастотной энергии поступает на входные цепи, создавая условия для незатухающих колебаний. Для правильного построения схем автогенераторов необходимо выполнение условий возникновения колебаний [7].

Для самовозбуждения генератора нужно выполнить два условия:

- 1) условие фаз – подача энергии с соответствующей фазой;
- 2) условие амплитуд – доставка необходимой и достаточной порции энергии в LC-контур для компенсации потерь и осуществления незатухающих колебаний.

В генераторе по схеме с обратной связью (см. рис. 1) выполнение условия фаз осуществляется правильным включением выводов катушек L_1 , L_2 ; для выполнения условия амплитуд нужно сближать катушки L_1 и L_2 или изменять число витков катушки обратной связи L_2 .

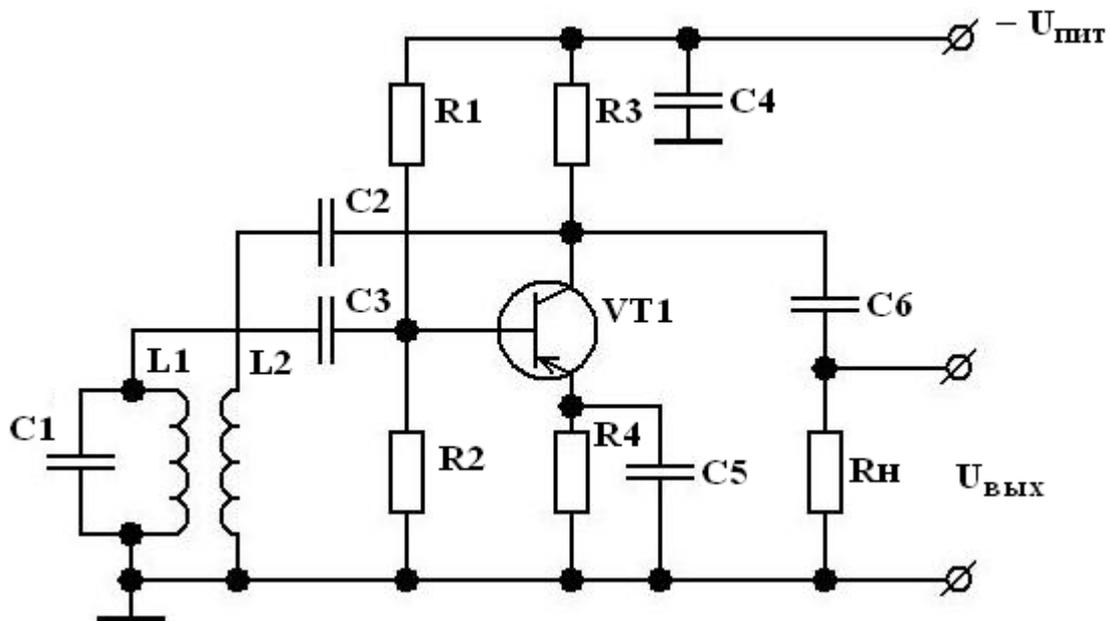


Рис. 1. Схема генератора с обратной связью

Схема генератора (см. рис. 1) называется схемой с трансформаторной обратной связью. Есть два варианта такой схемы:

- 1) контур включается в базовую, а катушка обратной связи – в коллекторную цепь;
- 2) в коллекторной цепи находится контур, выполняющий здесь роль нагрузки, а катушка обратной связи включена во входную цепь.

При включении питания или из-за тепловых шумов в контуре возбуждаются колебания, которые благодаря обратной связи оказываются незатухающими.

В некоторых генераторах отдельная катушка обратной связи не требуется, сигнал обратной связи поступает с части колебательного контура. Это так называемые **трехточечные схемы**, в которых транзистор подключен к контуру тремя точками – эмиттером, базой и коллектором.

В зависимости от того, откуда берут напряжение обратной связи – с катушки или конденсатора – различают трехточечные схемы с индуктивной (рис. 2) или с емкостной обратной связью (рис. 3).

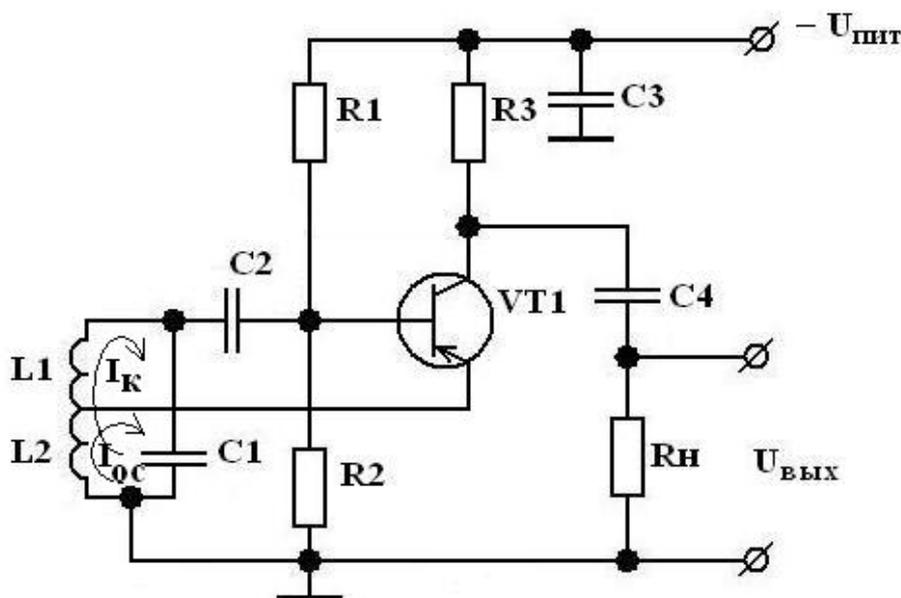


Рис. 2. Индуктивная трехточечная схема

В обеих этих схемах условие фаз выполняется в том случае, если эмиттер подключен к средней части контура, а коллектор и база – к его краям. Выполнение условия амплитуд связано с тем, какая доля контурной емкости или индуктивности подключена к участку «база – эмиттер».

В трехточечной схеме с индуктивной связью с выхода транзистора на его вход подается тем большая часть энергии, чем большая часть контурной катушки L_K включена между базой и эмиттером. Это значит, что, перемещая точку подключения эмиттера вниз по схеме, мы усиливаем обратную связь. При этом одновременно уменьшается коллекторная нагрузка: нагрузкой в этой схеме оказывается не весь контур, а только та часть его L_2 , которая включена между коллектором и эмиттером (верхний по схеме вывод L_2 подключен к эмиттеру, нижний – к коллектору через конденсатор фильтра C_3 (см. рис. 2)).

В емкостной трехточечной схеме (рис. 3) напряжение обратной связи снимается с делителя, который образован конденсаторами C_1 и C_2 . Здесь обратная связь тем сильнее, чем больше емкостное сопротивление конденсатора C_1 , а коллекторная нагрузка тем больше, чем больше емкостное сопротивление конденсатора C_2 .

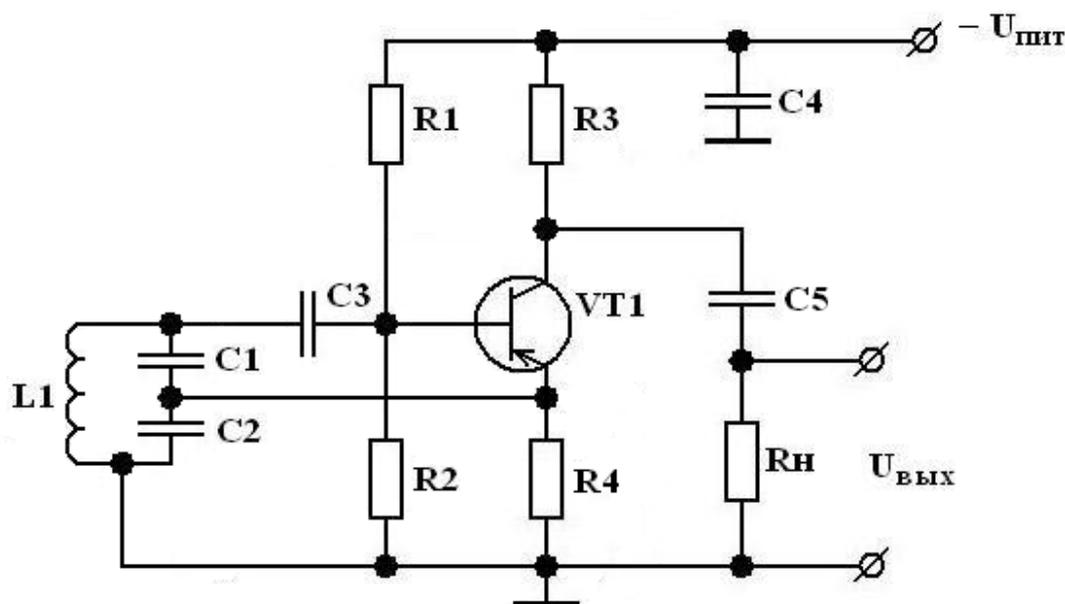


Рис. 3. Емкостная трехточечная схема

Емкостное сопротивление конденсатора обратно пропорционально его емкости, а поэтому с увеличением емкости $C1$ обратная связь ослабляется, а с увеличением емкости $C2$ сопротивление коллекторной нагрузки становится меньше. Все осложняется тем, что оба конденсатора определяют общую емкость контура $C_k = (C1C2)/(C1 + C2)$, а значит, и частоту электрических колебаний в нем. В схеме появляется еще одна деталь – резистор $R4$. Без него генератор вообще не работает – эмиттер отрезан от коллектора конденсаторами, и постоянная составляющая коллекторного тока может замкнуться только через $R4$. Подключить эмиттер к земле нельзя – окажется замкнутым накоротко конденсатор $C2$.

У трехточечной схемы с емкостной обратной связью есть некоторое преимущество по сравнению с другими схемами. Если изменять частоту генератора, заменяя контурные катушки, то в этой схеме достаточно производить переключение только одного провода (верхний конец катушки), в то время как в других схемах нужно одновременно производить два переключения (например, переключать верхний конец катушки и отвод обратной связи в схеме (см. рис. 2). Трехточечные схемы генераторов являются каноническими схемами. Любой генератор может быть представлен в виде емкостной или индуктивной трехточечной схемы.

Высокая стабильность частоты при прочих равных условиях – одно из основных требований, предъявляемых к автогенераторам вихретоковых датчиков. Существенный недостаток приведенных выше схем состоит в том, что единственный контур, параметры которого в первую очередь определяют частоту генерируемых колебаний, связан с нагрузкой. Во всех случаях связь с нагрузкой уменьшает добротность контура, а следовательно, ухудшает стабильность частоты. Приближение катушки индуктивности вихретокового датчика к проводящей мишени также снижает добротность колебательного контура. При снижении добротности ниже критической точки в результате уменьшения расстояния от катушки до проводящей мишени может наблюдаться срыв генерации частоты. Для вихретоковых датчиков перемещения стабильность частоты генератора является основным условием повышения показателей стабильности выходного сигнала и точности измерений.

Дифференциальный усилитель является одним из базовых узлов современной схемотехники. Такой усилитель может быть построен на биполярных или полевых транзисторах (рис. 4) и может быть использован для построения генератора гармонических колебаний.

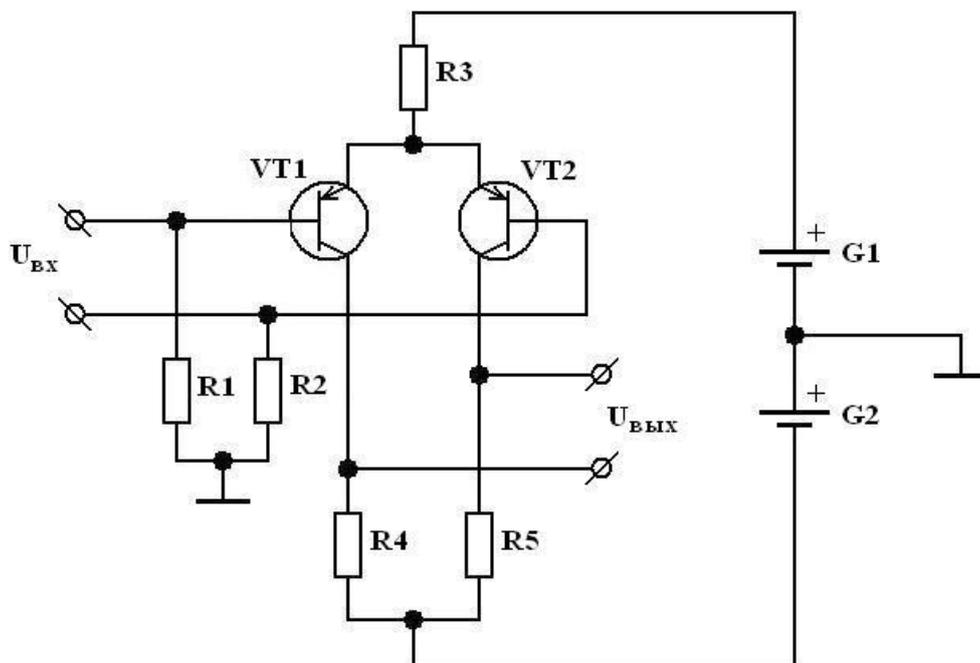


Рис. 4. Дифференциальный усилитель

Если на вход дифференциального усилителя подключить колебательный контур и выходной сигнал подать на вход в нужной фазе, то мы получим генератор гармонических колебаний с частотой колебательного контура.

На рис. 5 представлена схема генератора, собранного на дифференциальном усилителе. Целью создания любого генератора является стабильность его работы в широком диапазоне внешних воздействующих факторов. Добиться хороших результатов в этом направлении можно автоматической регулировкой параметров. Прежде чем осуществлять автоматическую регулировку, необходимо определить границы регулирования. Можно заметить следующую картину. В момент запуска в колебательной цепи автогенератора возникают свободные колебания, обусловленные включением источников питания, замыканием цепей, электрическими флуктуациями и т.д. Благодаря обратной связи эти первоначальные колебания усиливаются, причем на первом этапе, пока амплитуды малы, усиление является практически линейным и цепь можно рассматривать как линейную [8]. Энергетически процесс нарастания амплитуд объясняется тем, что за один период колебания усилитель передает в нагрузку энергию больше той, которая расходуется за это же время. С ростом амплитуд начинает проявляться нелинейность устройства (кривизна вольт-амперной характеристики усилительного элемента) и усиление уменьшается. Нарастание амплитуд прекращается, когда усиление уменьшается до уровня, при котором только компенсируется затухание колебаний в нагрузке, при этом энергия, отдаваемая усилителем за один период, оказывается равной энергии, расходуемой за это же время в нагрузке. Таким образом, на последнем этапе установления колебаний основную роль играет нелинейность цепи, без учета которой нельзя определить параметры стационарного режима автогенератора.

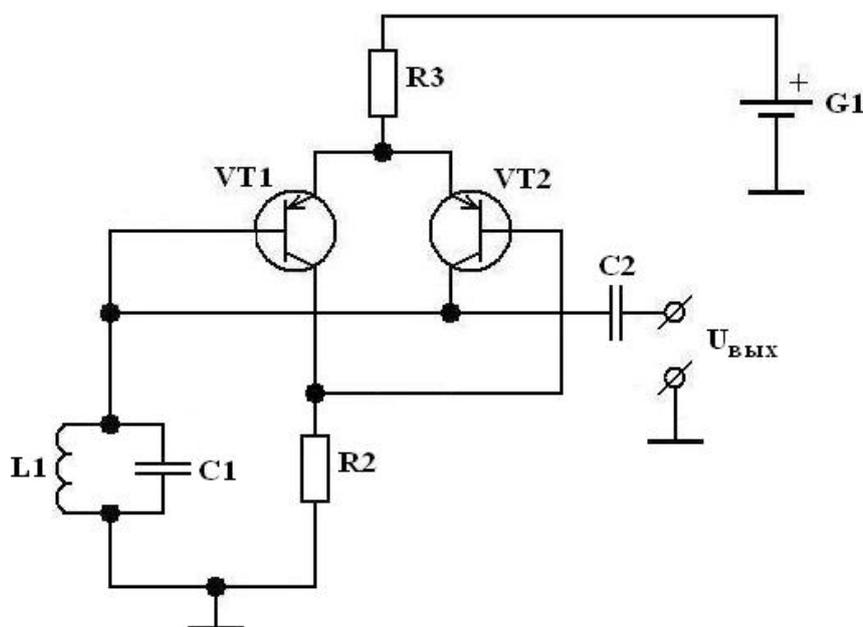


Рис. 5. Генератор на дифференциальном усилителе

Рассмотрим механизм возникновения и нарастания колебания в схеме генератора, представленной на рис. 5. В качестве экспериментальной базы используем модель схемы в симуляторе PSpice (MicroCAP). Допустим, что запуск автогенератора осуществляется включением в момент $t = 0$ постоянного напряжения U_{G1} . Бросок коллекторного тока I_k транзисторов возбуждает в контуре L_1, C_1 свободное колебание, параметры которого определяются параметрами контура, транзистора и обратной связи. На начальном этапе запуска, пока амплитуда колебания мала, представленную на рис. 5 цепь можно рассматривать как линейную. Для самовозбуждения автогенератора необходимо выполнение условия

$$K_{OC} > (1/K_y), \quad (1)$$

где K_{OC} – коэффициент обратной связи автогенератора; K_y – коэффициент усиления каскада.

Стационарный режим автоколебаний наступает, когда неравенство (1) обращается в равенство. Неравенство $K_{OC} > 1/K_y$ можно рассматривать как условие самовозбуждения автоге-

нератора любого типа. Однако механизм ограничения амплитуды колебания зависит от особенностей усилительного прибора и уровня напряжения питания.

Регулирующим параметром генератора может быть уровень его напряжения питания. Для определения параметров регулировочной характеристики будем плавно изменять напряжение питания каскада в модели.

При увеличении напряжения питания на дифференциальном каскаде генератор запускается. Результаты моделирования в PSpice (MicroCAP) плавного увеличения напряжения питания показали резкое возбуждение генератора. Затем плавное уменьшение напряжения питания приводит к плавному, по сравнению с запуском, затуханию колебаний (рис. 6).

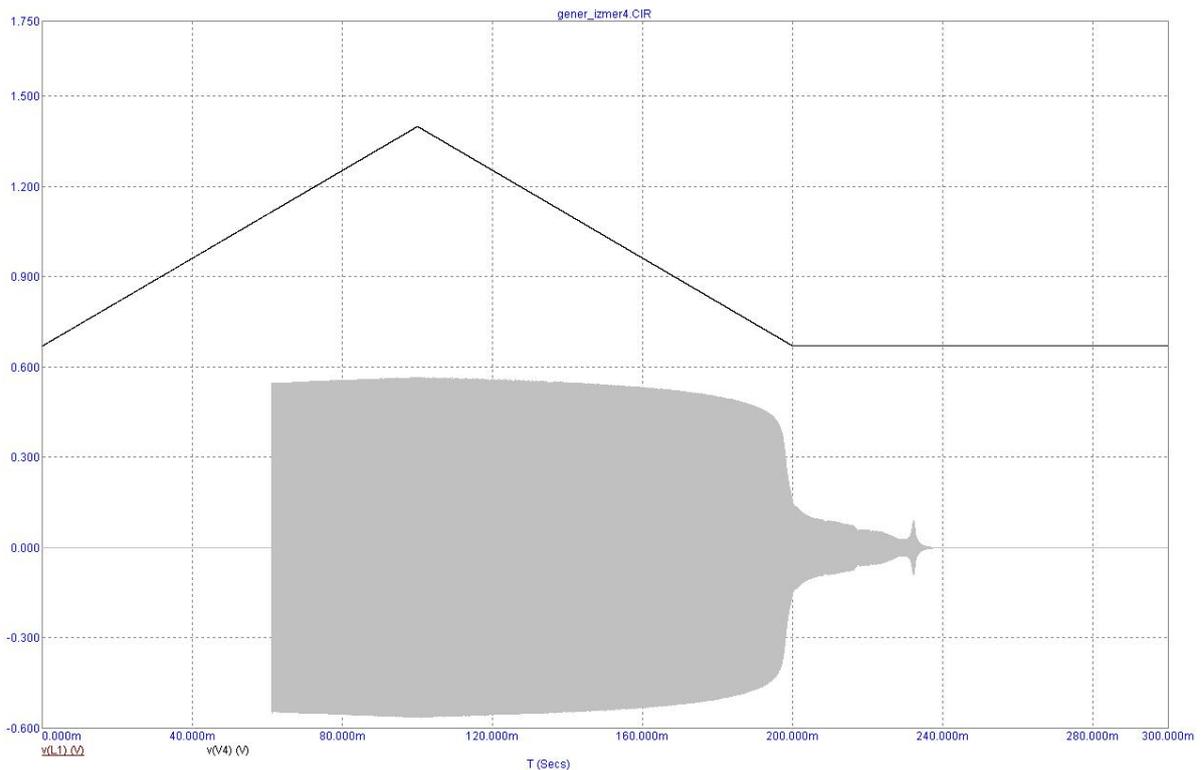


Рис. 6. Резкое возбуждение и плавное затухание колебаний

Симулятор и модель позволяют удерживать напряжение питания каскада выше точки возбуждения. Это позволяет обеспечить уверенный запуск колебаний генератора по схеме рис. 5. На выходе генератора при таком питании мы получим искаженный, несинусоидальный выходной сигнал, так как усилитель работает в режиме насыщения транзистора на его нелинейном участке (рис. 7).

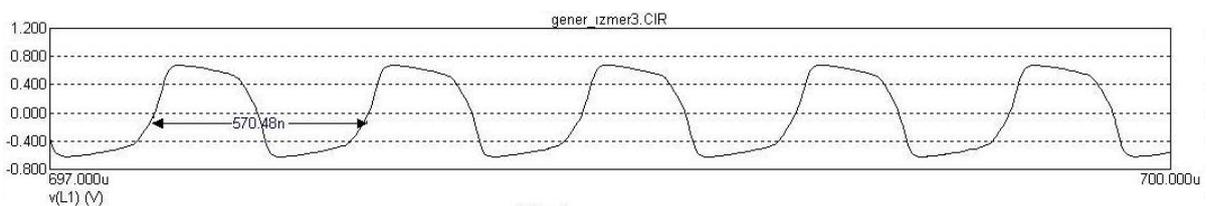


Рис. 7. Искаженный несинусоидальный выходной сигнал

Анализ сигнала показал несоответствие частоты колебаний генератора резонансной частоте колебательного контура. Контур настроен на частоту 2,4 МГц, а генератор заработал на частоте 1,7МГц. Неравенство частоты колебаний генератора и расчетного значения колебательного контура может быть связано с дополнительными эффектами, возникающими с изменением параметров емкости и индуктивности транзисторов в результате насыщения последних при работе на нелинейном участке усиления. Во время снижения напряжения питания

затухающий сигнал стал синусоидальным и его частота приблизилась к частоте колебательно-го контура (рис. 8).

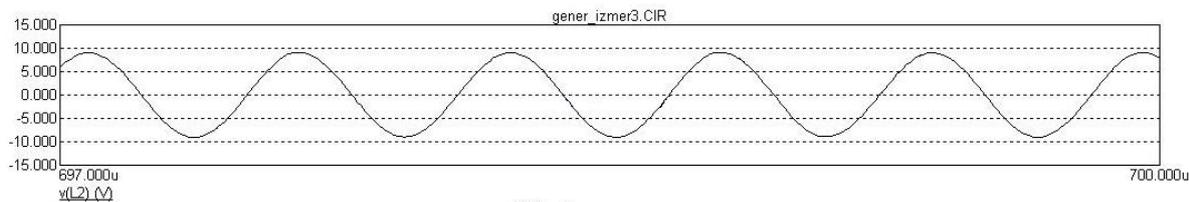


Рис. 8. Синусоидальный выходной сигнал с частотой контура

Следующий этап моделирования предполагает запуск генератора и переход на линейный участок усиления транзистора. В этом случае наблюдается синусоидальный сигнал с частотой, равной резонансной частоте колебательного контура.

Исследования в PSpice (MicroCAP) показали, что запуск генератора происходит при напряжении питания, превышающем напряжение, необходимое для работы на линейном участке усиления (рис. 9).

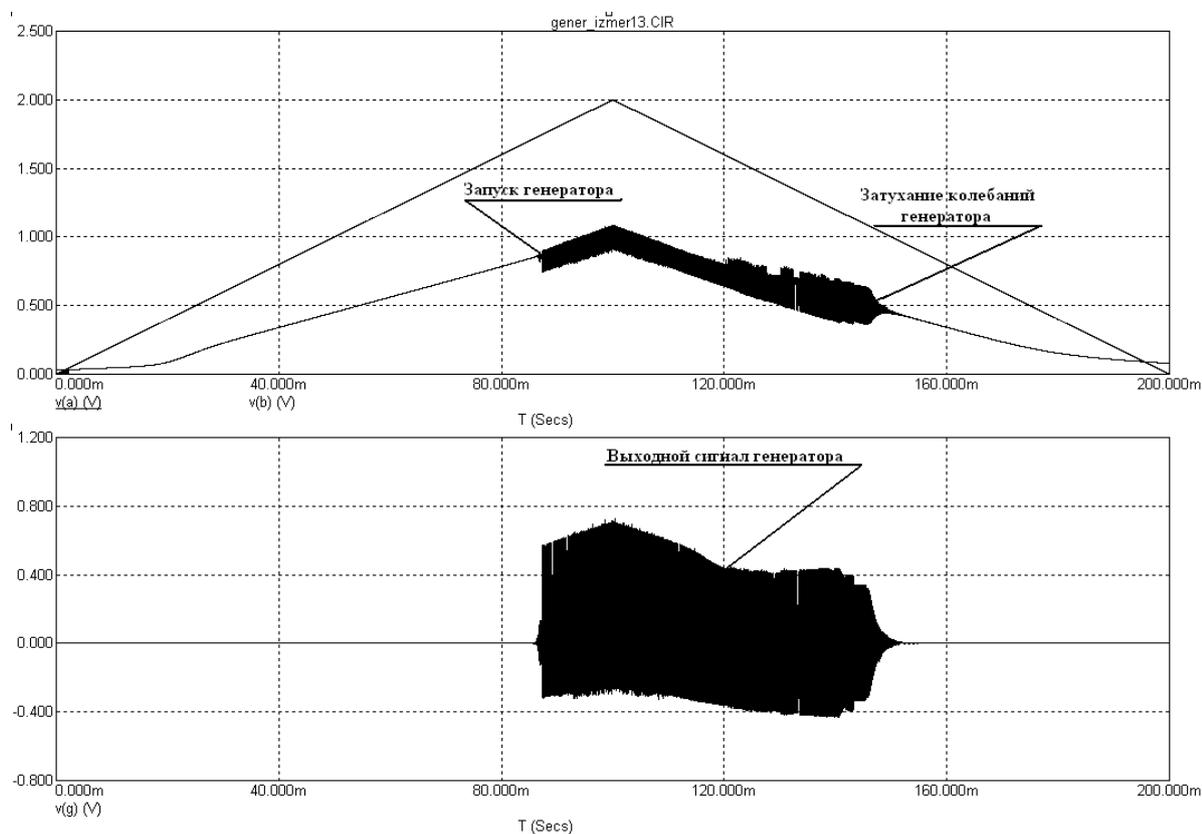


Рис. 9. Запуск и затухание колебаний от напряжения питания

Необходимо определить напряжение устойчивой генерации сигнала на линейном участке усиления. Это напряжение необходимо устанавливать после запуска генератора и выхода на устойчивый режим работы.

При подборе напряжения питания для работы схемы на линейном участке усиления в процессе моделирования выяснилось, что сигнал генератора либо затухает (рис. 10), либо возрастает (рис. 11), и невозможно подобрать фиксированное напряжение питания. Точка равновесия затухания или возрастания сигнала в стационарном режиме смещается при изменении внешних факторов.

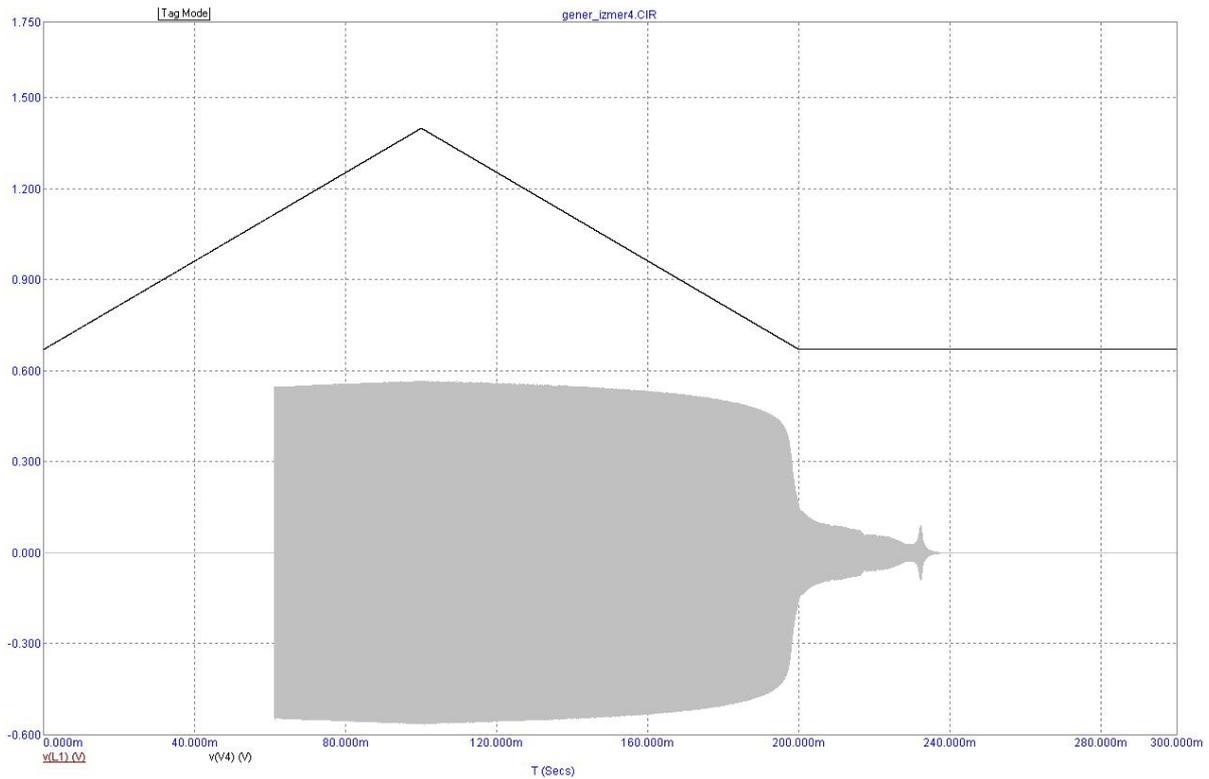


Рис. 10. Затухание сигнала после установки фиксированного напряжения питания

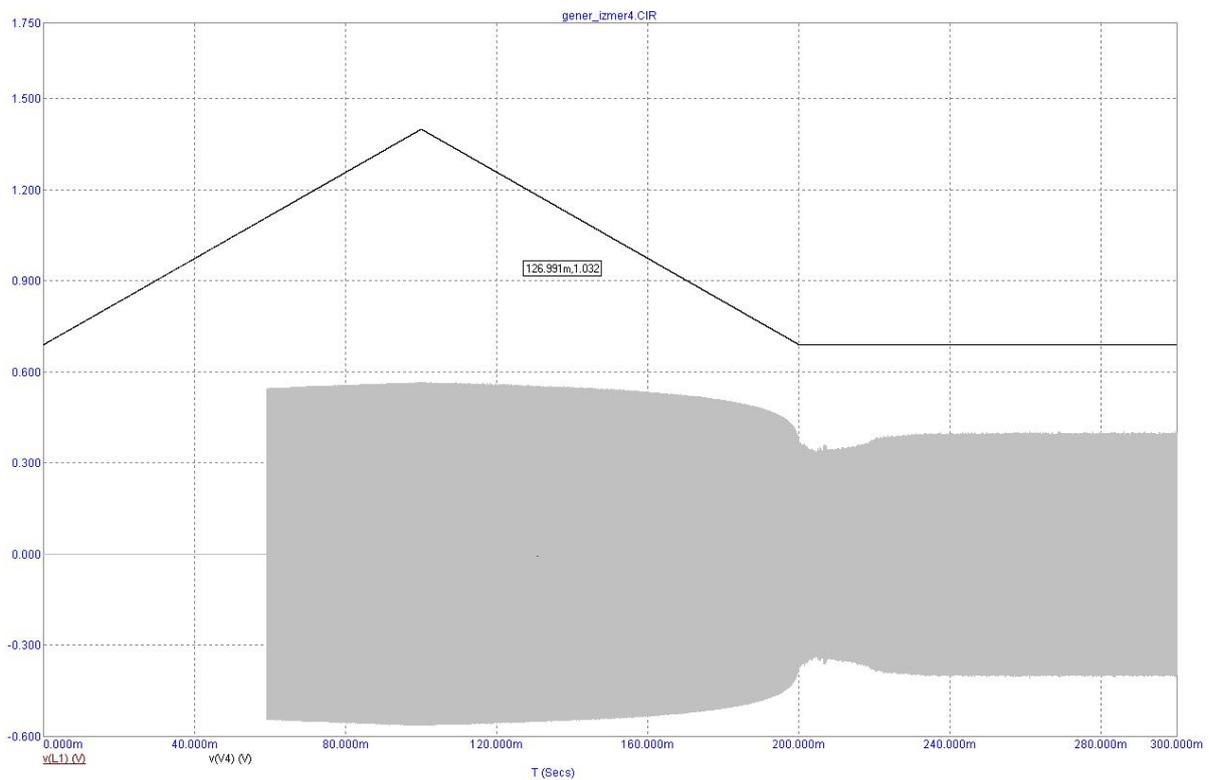


Рис. 11. Возрастание сигнала при фиксированном напряжении

Необходима система автоматического регулирования напряжения питания. Такая система может работать с помощью обратной связи и регулировать параметры схемы так, чтобы усилительный элемент работал на линейном участке. Дополнительным преимуществом такого решения является возможность генератора с обратной связью регулировать параметры схемы при изменении добротности катушки индуктивности от расстояния до ответной проводящей

мишени в вихретоковых датчиках перемещения. Сигналом о необходимости изменения напряжения питания может служить превышение определенного значения амплитуды генератора частоты.

На рис. 12 представлена блок-схема такой системы. Схема электрическая принципиальная в PSpice (MicroCAP) по такому принципу позволила установить нормальный режим работы генератора, при этом видно, как автоматическая регулировка осуществляет регулирование рис. 13. В схеме автоматической регулировки с обратной связью наблюдается синусоидальный сигнал с частотой колебательного контура, при этом меняется амплитуда сигнала при регулировании. Изменение амплитуды не так важно, так как используется частота генератора.



Рис. 12. Блок-схема генератора с обратной связью

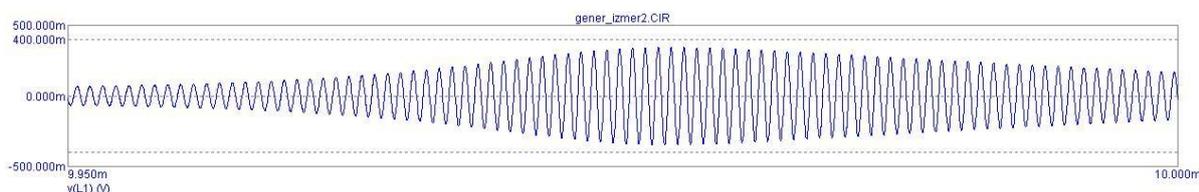


Рис. 13. Выходной сигнал после автоматической регулировки

Заключение

Стабильность по частоте генераторов вихретоковых датчиков перемещения при прочих равных условиях обеспечивается при работе генератора на линейном участке усилительного прибора. Автоматическая регулировка усиления за счет уровня напряжения питания позволяет получить генератор, работающий в требуемом режиме. Получена модель стабильного вихретокового датчика перемещения в широком диапазоне внешних воздействующих факторов. Обеспечена надежная работа схемы при изменении добротности катушки индуктивности в результате изменения расстояния до ответной проводящей мишени в вихретоковых датчиках перемещения.

Моделирование в PSpice (MicroCAP) стабилизации вихретоковых датчиков перемещения позволяет выявить эффекты, влияющие на возбуждение генератора и стабильность его работы. Модель позволяет оценить влияние внешних воздействующих факторов на изменение параметров транзисторов и стабильность работы вихретоковых датчиков перемещения. Такие решения позволяют повысить характеристики вихретоковых датчиков перемещения с частотной модуляцией сигнала.

Библиографический список

1. Дмитриенко, А. Г. Вихретоковые чувствительные элементы для бесконтактных датчиков перемещений / А. Г. Дмитриенко, Д. И. Нефедьев, А. А. Трофимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 1. – С. 4–10.
2. Аман, Е. Э. Автоколебания в измерительной технике: философские аспекты и практические результаты / Е. Э. Аман, А. И. Скалон // Датчики и системы. – 2015. – № 3. – С. 3–8.
3. Мокров, Е. А. Проблемы и перспективы развития датчиков аппаратуры / Е. А. Мокров // Микросистемная техника. – 2003. – № 9. – С. 11–17.
4. Абрамов, С. В. Применение двухчастотного метода выделения информативного сигнала при построении измерительных цепей первичных вихретоковых преобразователей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3. – С. 82–89.

5. Харкевич, А. А. Автоколебания / А. А. Харкевич. – М. : Гос. Изд-во технико-теоретической лит., 1954.
6. Новицкий, П. В. Основы информационной теории измерительных устройств / П. В. Новицкий. – Л. : Энергия, 1968. – 248 с.
7. Хавин М. Л. Схемотехника радиопередающих устройств / М. Л. Хавин. – М. : Энергия, 1975. – 96 с.
8. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – М. : Сов. радио, 1977. – 608 с.

Новиков Валентин Николаевич

консультант начальника КБ-1,
 Научно-исследовательский институт
 физических измерений
 (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
 E-mail: preobrazovatel@niifi.ru

Novikov Valentin Nikolaevich

adviser of the Director of KB-1,
 Scientific-research Institute
 of physical measurements
 (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Ульянин Николай Сергеевич

ведущий инженер-электроник,
 Научно-исследовательский институт
 физических измерений
 (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
 E-mail: preobrazovatel@niifi.ru

Ulyanin Nikolay Sergeevich

leading electronics engineer,
 Scientific-research Institute
 of physical measurements
 (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Цыпин Борис Вульфович

доктор технических наук, профессор,
 заместитель заведующего кафедрой
 ракетно-космического
 и авиационного приборостроения,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: cypin@yandex.ru

Tsy-pin Boris Vulfovich

doctor of technical sciences, professor,
 deputy head of the sub-department
 of rocket and space and aviation instrumentation,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 531.714.2.084.2:621.3.014.4

Новиков, В. Н.

Модель стабилизации вихретоковых датчиков перемещения / В. Н. Новиков, Н. С. Ульянин, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 3 (25). – С. 58–68. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-3-8.