

УДК 531.7

В.Ю. ЛАРИН, В.П. КВАСНИКОВ

*Национальный авиационный университет, Украина***РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФЕРРИМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, ВКЛЮЧЕННОГО В ГЕНЕРАТОРНЫЕ СХЕМЫ**

Предложена методика гармонического анализа выходного сигнала преобразователя, которая предусматривает предварительное преобразование схемы за счет замены одного регулирующего элемента двумя, которые могут быть описаны известными выражениями коэффициентов ряда Фурье. После замены регулирующего элемента выполняются статический расчет моделируемой схемы в точке, где замыкается обратная связь и составляющие выходного сигнала представлены функцией обратной связи от входного постоянного сигнала и амплитуды первой гармоники.

Ключевые слова: ферромагнитные преобразователи, решающий элемент, автогенераторные схемы, математическая модель, гармонический анализ.

Введение

В качестве преобразовательных элементов в приборах с ферромагнитными преобразователями (ФиМП) используются генераторные схемы, решающим элементом (РЭ) которых является транзистор, чувствительным элементом является частото-задающая цепочка с индуктивной катушкой, образующие открытый контур и обратную связь генератора. Информативным параметром может быть амплитуда генерируемого сигнала или частота. До настоящего времени известные модели анализа свойств индуктивных катушек, как элементов частото-задающей цепочки генератора, а также применение линейной модели транзистора делают трудоёмким расчет генераторных схем. В устройствах подобного типа, содержащих, например, УПТ-УГ [1, 2] исследовались хотя и важные, но лишь отдельные проблемы, связанные с такого рода усилителями. Последнее свидетельствует о том, что УПТ-УГ является довольно сложной нелинейной автоколебательной системой, для ее проектирования требуются значительно более глубокий анализ и разработка методов расчета.

Промышленные датчики [3], выпускаемые в бывшем СССР основаны на изменении добротности контура за счёт потерь, вносимых контролируемым ферромагнитным объектом, при котором происходит срыв генерации и на выходе появляется сигнал логической единицы. Они характеризуются малым (до 16 мм) диапазоном срабатывания. На этом же принципе построены датчики фирмы Siemens und Galske, Германия [4]. Но их корпус не компенсирует потери при встраивании в металлические объекты. Известны также принципы построения средств

контроля положения ферромагнитных объектов [5] с более расширенным диапазоном контроля (до 50 мм). Все указанные средства имеют дискретную характеристику преобразования. Они не предусматривают аналоговый контроль, не обеспечивают функции контроля скорости, перемещения, то есть не предусматривают возможность работы генераторных схем в жестком и мягком режимах, не учитывают возможность изменения принципов действия обусловленного взаимным влиянием частоты сигнала и частоты генерации. Работа генератора известных средств основана на следующем. При выполнении условия возбуждения возникают колебания с возрастающей во времени амплитудой настолько, что нелинейность становится существенной, изменяется постоянная составляющая сигнала на выходе транзистора и изменяется положение его рабочей точки. При этом уменьшается коэффициент передачи РЭ и амплитуда генерируемых колебаний стабилизируется, то есть выполняется условие баланса амплитуд и фаз.

Постановка задачи

Для того, чтобы спроектировать ФиМП с заданными метрологическими характеристиками необходимо найти зависимость амплитуды колебаний от параметров катушки. Для чего необходимо вести расчёт во временной области, фиксировать начало установившегося процесса и искать численными методами амплитуду колебаний. Этого достаточно при необходимости построения только выходной характеристики. Для оптимизации выходной характеристики и параметров схемы данная задача требует экономически не оправданных затрат ресурсов вычислительной техники.

Изложение основного материала

Укрупнённый алгоритм методики моделирования и анализа генераторных схем, который приведен на рис. 1, показывает, что решение дифференциальных уравнений неэффективно.

Для того чтобы упростить методику вычислений во временной области можно использовать методику гармонического анализа. Для этого строятся характеристики зависимости постоянной составляющей сигнала на выходе от постоянной и переменной составляющих сигнала на входе чувствительного элемента и амплитуды основной гармоники сигнала на выходе от тех же входных величин (рис. 2).

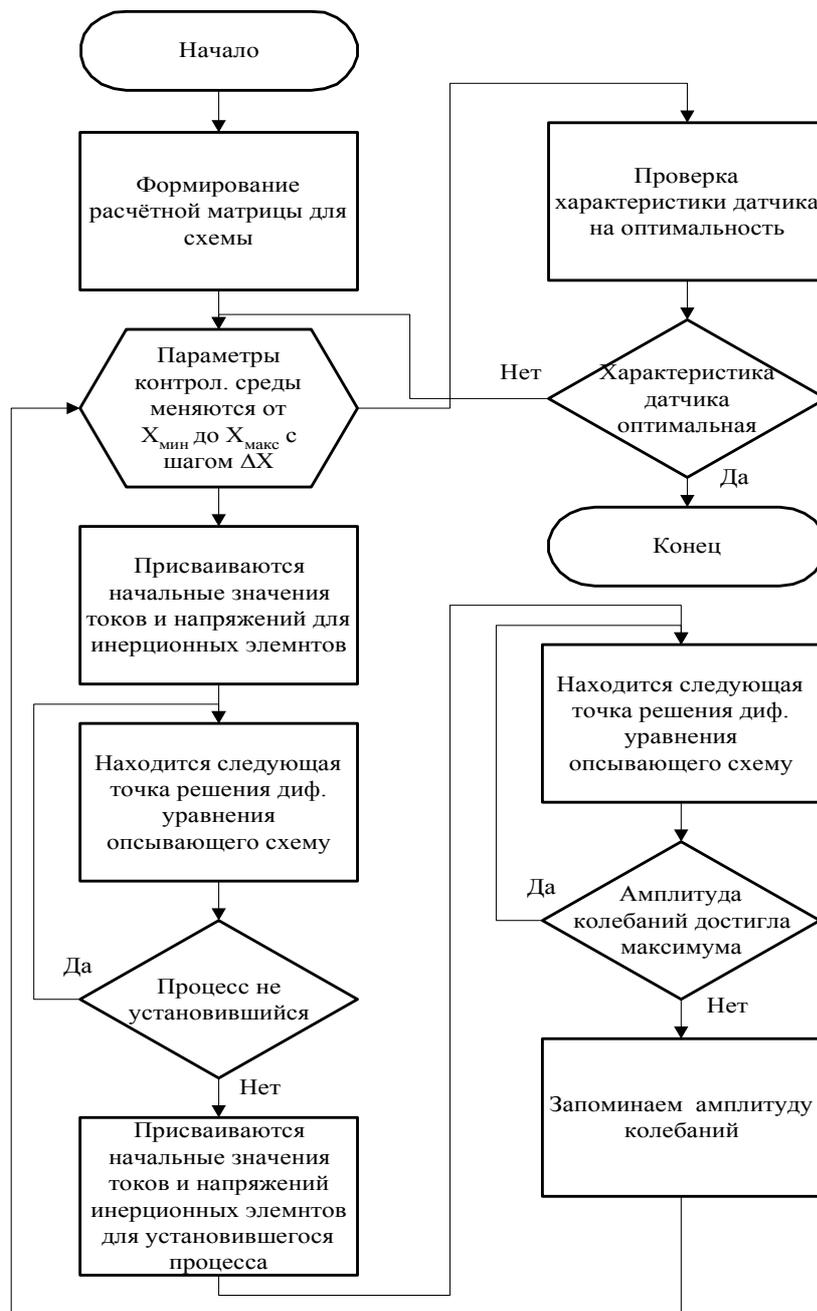


Рис. 1. Укрупнённый алгоритм анализа генераторных схем

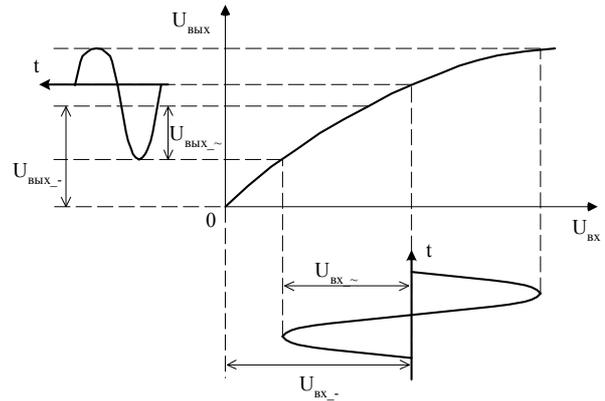


Рис. 2. Графическое представление задачи:

$U_{ВХ_-}$ – постоянная составляющая входного сигнала,
 $U_{ВЫХ_-}$ – постоянная составляющая выходного сигнала,
 $U_{ВХ_~}$ – переменная составляющая входного сигнала,
 $U_{ВЫХ_~}$ – переменная составляющая выходного сигнала

Для наглядности и формализации анализа с целью автоматизации моделирования представим РЭ в виде двух нелинейных элементов, т.е. будем считать, что на входе РЭ сигнал имеет вид:

$$U_{ВХ} = U_{ВХ_-} + U_{ВХ_~} \times \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t),$$

где $U_{ВХ_-}$ – постоянная составляющая входного сигнала, $U_{ВЫХ_~}$ – переменная составляющая входного сигнала, f – частота основной гармоники сигнала.

Если выходной сигнал описывается однозначной функцией $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$, то мы можем решить поставленную задачу с помощью характеристик, описывающих постоянную составляющую и амплитуду основной гармоники сигнала на выходе нелинейного элемента по известным формулам для коэффициентов ряда Фурье:

$$U_{ВЫХ_-}(U_{ВХ_-}, U_{ВХ_~}) = \frac{1}{f} \int_0^f f(U_{ВХ_-} + U_{ВХ_~} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)) dt; \quad (1)$$

$$U_{\text{ВЫХ_}\sim}(U_{\text{ВХ_}\sim}, U_{\text{ВХ_}\sim}) = 2 \cdot f \cdot \int_0^{1/f} f(U_{\text{ВХ_}\sim} + U_{\text{ВХ_}\sim} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt. \quad (2)$$

Если для данной конкретной модели датчика найти аналитическое выражение для характеристик РЭ

$$U_{\text{ВЫХ_}\sim}(U_{\text{ВХ_}\sim}, U_{\text{ВХ_}\sim})$$

и

$$U_{\text{ВЫХ_}\sim}(U_{\text{ВХ_}\sim}, U_{\text{ВХ_}\sim}),$$

то это уменьшит время анализа схемы датчика.

Найти эмпирическое выражение характеристик РЭ можно также путем аппроксимации её степенным полиномом вида:

$$U_{\text{ВЫХ_}\sim}(U_{\text{ВХ_}\sim}, U_{\text{ВХ_}\sim}) = \sum_{k=0}^N \sum_{l=0}^N a_{k,l} \cdot U_{\text{ВХ_}\sim}^k \cdot U_{\text{ВХ_}\sim}^l;$$

$$U_{\text{ВЫХ_}\sim}(U_{\text{ВХ_}\sim}, U_{\text{ВХ_}\sim}) = \sum_{k=0}^N \sum_{l=0}^N a_{k,l} \cdot U_{\text{ВХ_}\sim}^k \cdot U_{\text{ВХ_}\sim}^l.$$

При этом необходимо численными методами найти несколько точек характеристик:

$$U_{\text{ВЫХ_}\sim}(U_{\text{ВХ_}\sim}, U_{\text{ВХ_}\sim});$$

$$U_{\text{ВЫХ_}\sim}(U_{\text{ВХ_}\sim}, U_{\text{ВХ_}\sim}),$$

по которым затем осуществляется аппроксимация полиномом.

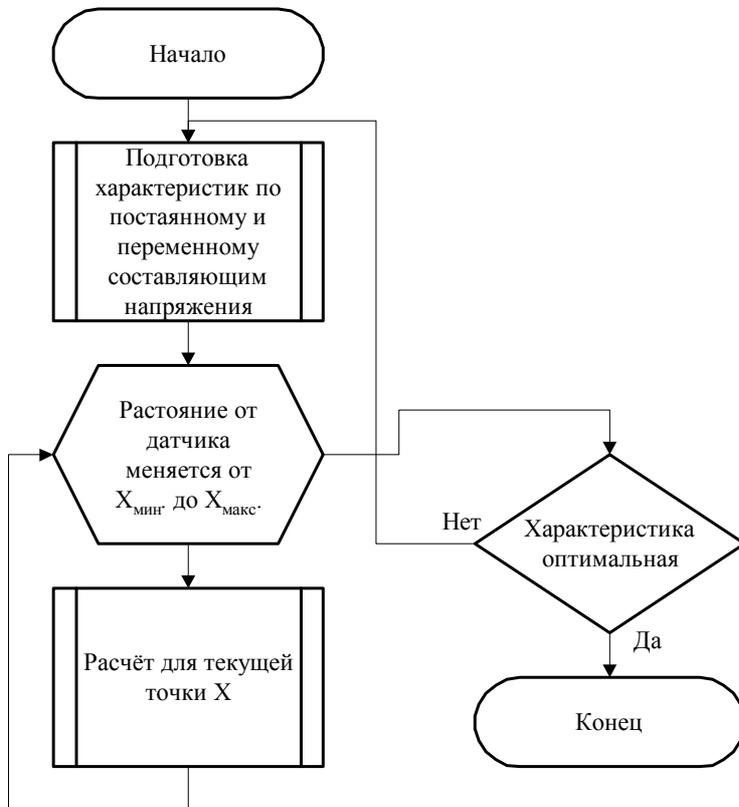


Рис. 3. Алгоритм расчёта схем содержащих РЭ по методу гармонической линеаризации

Методы решения такой задачи трудоемки и не дают достаточной точности на всем диапазоне.

Формулы (1) и (2) представляют собой передаточные характеристики устройств, для нелинейных элементов по постоянному напряжению и по напряжению первой гармоники. Теперь необходимо преобразовать исходную моделируемую схему, заменив РЭ двумя элементами, описанными формулами (1) и (2). Получив преобразованную схему, можно проанализировать её по предложенной методике, отличающейся от известных тем, что расчёт ведётся в статике, не прибегая к расчетам во временной области. Это позволяет уменьшить количество расчётов.

Алгоритм методики представлен на рис. 3.

Если ток на выходе РЭ описывается уравнением:

$$I_{\text{ВЫХ}} = f_{\text{РЭ}}(U_{\text{ВЫХ}}, U_{\text{ВХ}}),$$

а зависимость выходного тока и напряжения на выходе РЭ связаны зависимостью, определяемой схемой, в которую он включён:

$$I_{\text{ВЫХ}} = f_{\text{СХ}}(U_{\text{ВЫХ}}),$$

то можно найти либо точное, либо эмпирическое решение зависимости, связывающей выходное напряжение с входным:

$$U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}}),$$

или привязываться к точке схемы, в которой замыкается обратная связь:

$$U_{\text{ВЫХ}} = f_{\text{ОС}}(U_{\text{ВХ}}).$$

Если разомкнуть обратную связь и подставить вместо $U_{\text{ВХ}}$ выражение

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ_}\sim} + U_{\text{ВХ_}\sim} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

и применить методику, описанную выше, то можно записать зависимости:

$$U_{\text{ВЫХ_}\sim} = f_{\text{ОС_}\sim}(U_{\text{ВХ}});$$

$$U_{\text{ВЫХ_}\sim} = f_{\text{ОС_}\sim}(U_{\text{ВХ}})$$

по формулам для коэффициентов ряда Фурье.

Варьируя переменными $U_{\text{ВХ_}\sim}$ и $U_{\text{ВХ_}\sim}$ в пределах определяемых диапазоном входных напряжений, получаем двумерные характеристики для РЭ по постоянной составляющей напряжения

$$U_{\text{ВЫХ_}\sim} = f_{\text{ОС_}\sim}(U_{\text{ВХ_}\sim}, U_{\text{ВХ_}\sim})$$

и по переменной составляющей напряжения

$$U_{\text{ВЫХ_}\sim} = f_{\text{ОС_}\sim}(U_{\text{ВХ_}\sim}, U_{\text{ВХ_}\sim}).$$

Если замкнуть цепь обратной связи, то $U_{\text{ВЫХ_}\sim}$ и $U_{\text{ВЫХ_}\sim}$ становятся входными, и получаем систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} U_{\text{вх}_-} = f_{\text{OC}_-}(U_{\text{вх}_-}, U_{\text{вх}_-}); \\ U_{\text{вх}_\sim} = f_{\text{OC}_\sim}(U_{\text{вх}_-}, U_{\text{вх}_\sim}). \end{cases}$$

Решив эту систему численными методами, найдём значение для $U_{\text{вх}_-}$ и $U_{\text{вх}_\sim}$.

При необходимости вычисленные значения можно привести к любой точке схемы.

Выводы

Предложен метод, позволяющий перейти от решения дифференциальных уравнений во временной области к расчету в статике по известным зависимостям постоянной составляющей сигнала на выходе и амплитуды основной гармоники сигнала на выходе от постоянной и переменной составляющих сигнала на входе чувствительного элемента. Для конкретной автогенераторной схемы при известной зависимости тока в точке замыкания обратной связи получаем систему уравнений для постоянной и пе-

ременной составляющих напряжения на выходе, решаемую с помощью численных методов.

Литература

1. Павленко В.А. Автогенераторные усилители в приборах контроля и автоматики / В.А. Павленко. - М.: Энергия, 1969. - 120 с.
2. Дашенков В.М. Исследование автогенераторов гармонических колебаний / В.М. Дашенков. - Минск: БГУИР, 2002. - 310 с.
3. Ивенский Ю.Н. Бесконтактные путевые переключатели / Ю.Н. Ивенский. - М.: Энергия, 1971. - 136 с.
4. Патент 1152191 ФРГ. Усилитель с колебательным контуром в компенсационной схеме / Siemens und Galske. - 1963. - 7 с.
5. Ларин В.Ю. Основы построения приборов и систем с ферри- и ферромагнитными преобразователями / В.Ю. Ларин. - Донецк: Вебер, 2007. - 368 с.

Поступила в редакцию 2.03.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры аэронавигационных систем В.В. Конин, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФЕРИМАГНІТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА, ВКЛЮЧЕНОГО В ГЕНЕРАТОРНІ СХЕМИ

В.Ю. Ларін, В.П. Квасніков

Запропонована методика гармонійного аналізу вихідного сигналу перетворювача, яка передбачає попереднє перетворення схеми за рахунок заміни одного регулюючого елементу двома, які можуть бути описані відомими виразами коефіцієнтів ряду Фур'є. Після заміни регулюючого елементу виконують статичний розрахунок модельованої схеми для точки, в якій замикається зворотний зв'язок та складові вихідного сигналу представлені як функція зворотного зв'язку від вхідного постійного сигналу та амплітуди першої гармоніки

Ключові слова: феримагнітний перетворювач, вирішуючий елемент, автогенераторні схеми, математична модель, гармонійний аналіз

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FERRIMAGNETIC TRANSFORMER, PLUGGED IN OSCILLATOR CIRCUIT

V.Yu. Larin, V.P. Kvasnikov

The method of harmonious analysis of initial signal of transformer is offered, which foresees previous transformation of chart due to replacement of one regulative element two, which can be described the known expressions of coefficients of row of Fourie. After replacement of regulative element execute the static calculation of the designed chart in a point, where the snapped to feed-back and the constituents of output signal are presented as function of feed-back from component of direct current voltage and amplitude of the first harmonic

Key words: ferromagnetic transformer, decision element, circuit of active oscillator, mathematical model, harmonic analyze.

Ларин Віталій Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедри аэронавигационных систем Национального авиационного университета, Киев, Украина.

Квасников Владимир Павлович – д-р техн. наук, проф., заве. кафедрой информационных технологий Национального авиационного университета, Киев, Украина.