

*6*  
*A-43*  
МИНИСТЕРСТВО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ  
СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СССР

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ  
(ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ)

На правах рукописи

Б. Н О В А К

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЦВМ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ  
СЕРДЕЧНИКОВ С ШГ. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ  
ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СХЕМАХ

(№ 253 - приборы и устройства автоматики и телемеханики)

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Москва - 1969

6  
A-43  
МИНИСТЕРСТВО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ  
СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СССР

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ  
(ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ)

На правах рукописи

Б. Н О В А К

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЦВМ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ  
СЕРДЕЧНИКОВ С ППГ. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ  
ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СХЕМАХ

(№ 253 - приборы и устройства автоматики и телемеханики)

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Москва - 1969

МИНИСТЕРСТВО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ  
СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СССР

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ  
(ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ)

На правах рукописи

Б. Н О В А К

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЦВМ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ  
СЕРДЕЧНИКОВ С ШГ. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ  
ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СХЕМАХ

(№ 253 - приборы и устройства автоматики и телемеханики)

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Москва - 1969

Развитие современной техники тесно связано с широким внедрением устройств автоматики и телемеханики, вычислительных машин и измерительной техники. При этом все возрастающую роль играют дискретные устройства, с помощью которых решаются, например, такие задачи, как программное управление производственными процессами, блокировка, контроль, сигнализация, защита. Устройства такого рода подчас весьма сложны, однако ввиду того что они осуществляют некоторые логические преобразования, их можно построить из набора относительно простых элементов, каждый из которых выполняет некоторую элементарную логическую функцию.

В указанных областях техники нашли широкое применение элементы, выполненные на магнитных сердечниках с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ). (Такие сердечники могут быть изготовлены как из ферритов, так и из тонкой металлической ленты.) Разработкой магнитных элементов вычислительной техники и автоматики, их анализом, расчетом и теорией их работы занимается в СССР ряд организаций, причем определяющее влияние оказали работы большого числа советских ученых<sup>х)</sup>, в том числе М.А. Розенблата, Ю.М. Шамаева, Н.П. Васильевой, Л.М. Авдеевской, Н.В. Королькова, В.В. Бардижа, Е.П. Балашова. Однако в подавляющем большинстве имеющихся работ при проектировании логических элементов, включающих сердечники с ППГ, используются лишь самые простые модели процессов перемагничивания

---

х) Подробный список работ, касающихся магнитной техники, приведен в [1], [2]

сердечников, несмотря на то что в настоящее время предложены более точные модели, описывающие процесс перемагничивания сердечников с ППГ. К таким моделям можно отнести модели, предложенные в [3], [4]. Использование тех моделей процесса перемагничивания, которые представляются нелинейными дифференциальными уравнениями, аналитическое решение которых отсутствует, практически невозможно без применения электронных вычислительных машин (ЭВМ). В настоящее время ЭВМ нашли широкое применение и поэтому отказ от более точных моделей процесса перемагничивания, ввиду их сложности, ничем не обоснован. Именно трудоёмкостью решения некоторых уравнений, аппроксимирующих процесс перемагничивания, обусловлено, по-видимому, отсутствие в литературе сравнения отдельных моделей друг с другом.

Более трудоёмкую задачу, чем задача расчета переходного процесса в сердечниках с ППГ, представляет собой расчет характеристик передачи (характеристик вход-выход) магнитных логических элементов даже в случаях, когда процессы перемагничивания содержащихся в них сердечников описываются простейшими аппроксимациями [5]. В связи с вышесказанным представляют интерес вопросы применения ЭВМ для расчета процесса перемагничивания сердечников с ППГ, а также для расчета характеристик передачи магнитных логических элементов, включающих тороидальные сердечники с ППГ.

Характеристики передачи логических элементов (ЛЭ) определяют в значительной степени функциональную устойчивость логических схем. Этот вопрос приобретает особенно большое значение для ЛЭ промышленной автоматики, от которых требуется, чтобы они успешно работали в сложных логических схемах, так как в процессе проектирования таких элементов неизвестно, какие схемы из них будут строиться для управления отдельными конкретными производствами, в отличие от ЛЭ вычислительной техники, которые предназначены для работы в стандартных блоках, структура которых известна. В связи с этим большое значе-

ние имеют работы, посвященные функциональной устойчивости различных типов цифровых элементов. Наиболее значительными в этой области являются работы Н.П. Васильевой, которой была разработана теория функционально устойчивого преобразования и передачи сигналов системами ЛЭ [5], и работы Д.М. Шамаева, посвященные условиям совместной устойчивой работы магнитополупроводниковых ЛЭ с неидентичными характеристиками передачи, методам их производственного контроля и вероятностным методам анализа передачи двоичной информации по регистру сдвига [6], [7]. Использование методики проектирования, изложенной в [5], возможно только при хорошем согласовании характеристик передачи (ХП) ЛЭ с экспериментальными. Вместе с тем для ряда ЛЭ получение аналитического выражения, достаточно точно (в пределах  $10 \div 20\%$ ) аппроксимирующего ХП логического элемента, затруднительно или даже невозможно. Большой интерес поэтому представляет определение необходимых условий, при которых логические схемы, построенные на логических элементах, ХП которых заданы графически (на основе проведенного эксперимента или расчета на ЭВМ), будут работать функционально устойчиво<sup>х</sup>.

Настоящая работа посвящена приведенным выше вопросам вопросу использования ЭЦВМ для расчета переходного процесса при перемагничивании сердечников с ППГ, вопросам расчета ХП магнитных элементов на ЭЦВМ, а также вопросам функциональной устойчивости комплексов ЛЭ при их работе в логических схемах.

х) Термин "функциональная устойчивость" понимается в том же смысле, что и в [5]. Логическая схема функционально устойчива, если входные или выходные сигналы ЛЭ схемы принимают значение только из подмножеств, соответствующих тому логическому значению, которое должна иметь логическая переменная в данном месте схемы.

I.

I. Первая часть работы посвящена использованию ЭЦВМ для расчета процессов перемагничивания сердечников с ППГ, сравнению отдельных моделей процессов перемагничивания друг с другом, а также методике расчета характеристик передачи магнитных элементов на ЭЦВМ.

Основное затруднение, с которым встречаемся при расчете магнитных элементов, представляет собой нелинейность статических и динамических характеристик сердечников с ППГ. Статические и динамические свойства сердечника определяются поверхностью динамического состояния (ПДС) [1], уравнение которой можно представить в виде:

$$\frac{dB}{dt} = f(B, H) \quad (1)$$

Форма этой поверхности является довольно сложной и ее не удается выразить простым аналитическим выражением. Разные авторы поэтому приводят аппроксимации ПДС сердечника некоторыми другими поверхностями, аналитическое выражение которых известно. Однако даже в таком случае не все дифференциальные уравнения, представляющие аппроксимирующие поверхности, имеют аналитическое решение и поэтому зависимости  $\dot{B}(t)$  могут быть получены лишь некоторыми из графических или численных методов.

В качестве рассматриваемых моделей были выбраны такие, которые уже нашли или могут найти широкое применение при расчете устройств, содержащих сердечники с ППГ, а именно:

а) Модель, аппроксимирующая ПДС уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{B}(B, H) &= r_m \left(1 - \frac{B^2}{B_s^2}\right) (H - H_{01}) && \text{при } H_{01} \leq H \leq H_{02} \\ \dot{B}(B, H) &= r_{m2} \left(1 - \frac{B^2}{B_s^2}\right) (H - H_{02}) && \text{при } H = H_{01} \\ \dot{B}(B, H) &= 0 && \text{при } H \leq H_{01} \end{aligned} \quad (2)$$

Эта аппроксимация подробно рассмотрена в работе [1].

б) Модель, приведенная в [3]:

$$\dot{B}(B, H) = \lambda \left\{ 1 - \left[ \frac{2B + B_s - B_{CT}(H)}{B_s + B_{CT}(H)} \right]^2 \right\} (H - H_0)^n \quad \text{при } H_0 \leq H \leq H_{гр} \quad (3)$$

$$\text{где } \nu = \frac{H_{гр} - H_0}{H_{гр} - H_{02}}, \lambda = \frac{r_{m2}}{\nu (H_{гр} - H_0)^{n+1}} \quad (4)$$

и где  $\dot{B}_{max} = 0$  при  $H = H_0$ .

В области полей  $H \geq H_{гр}$  используется уравнение (26).

в) Модель, предложенная в [4]:

$$\dot{B}(B, H) = r_m \left(1 - \frac{B^2}{B_s^2}\right) \left\{ 1 + \mathcal{H}[H - H_{CT}(B)] \right\} [H - H_{CT}(B)] \quad (5)$$

Зависимости  $B_{CT}(H)$  или  $H_{CT}(B)$  в (3) и (5) определяются статической петлей гистерезиса (СПГ). Поскольку СПГ задана, как правило, графически и аналитическое выражение для нее отсутствует, то уравнения (3) и (5) можно решить лишь графическими или численными методами. В процессе решения уравнений (3), (5) способ аппроксимации СПГ играет очень важную роль, так как от него зависит не только точность решения, но в значительной степени и общее время, затрачиваемое вычислительной машиной на решение уравнений. В работе [3] предпринята попытка заменить СПГ отрезками двух гипербол, однако результирующее аналитическое выражение получается громоздким. Кроме того, такой подход не является общим для разных марок сердечников, так как в зависимости от СПГ изменяется и класс функций, пригодных для аппроксимации СПГ. Поэтому в главе I рассмотрены способы, позволяющие сделать аппроксимирование СПГ однообразным (и, следовательно, удобно осуществимым на ЭЦВМ) независимо от марки используемого сердечника, а именно: аппроксимирование СПГ интерполяционным полиномом Лагранжа  $n$ -й степени, разбиение  $(n+1)$  значений СПГ на группы по  $(m+1)$  значений и аппроксимация этих групп полиномами  $m$ -й степени, точечное квадратичное аппроксимирование и равномерное Чебышевское приближение СПГ полиномом  $k$ -й степени. Наиболее подходящим с точки зрения затрат машинного времени и сложности подготовки исходных данных оказался второй из перечисленных способов, когда СПГ аппроксимируется отрезками полиномов второй степени, причем увеличение числа точек, которыми задается СПГ, сверх 30-40 практически уже не сказывается на точности полученных зависимостей  $\dot{B}_{расч}(t)$ .

В работе составлены для ЭЦМ программы, записанные на языке АЛГОЛ-60, позволяющие решать уравнения (2б), (3) и (5). По составленным программам проводился на ЭЦМ "Минск-2" (симулятор МЭМ-2) расчет процесса перемангничивания для группы ферритовых сердечников 1,3 ВТ, 0,16 ВТ, К-273, В-44 (марки сердечника обозначены согласно [1]) при разных величинах напряженности магнитного поля  $H$ . Кроме того, на ЭЦМ произведены расчеты процессов перемангничивания, учитывающие разность внешнего и внутреннего диаметров сердечника. Сердечник в этом случае рассматривается как  $n$  слоев и процесс перемангничивания каждого из них описывается уравнением (2б). Сравнение рассчитанных зависимостей  $\dot{B}_{расч}(t)$  с экспериментальными  $\dot{B}_{эксп}(t)$  позволило сделать для исследуемой группы сердечников следующие заключения:

А. Величина меры отклонения  $M$  [в качестве меры отклонения импульса  $\dot{B}_2(t)$  от  $\dot{B}_1(t)$  принимаем отношение  $M = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100\%$ , где  $\Delta P = \int_0^{\tau_s} |\dot{B}_1(t) - \dot{B}_2(t)| dt$ ,  $P = \int_0^{\tau_s} \dot{B}_1(t) dt$  и от  $\dot{B}_{расч}(t)$  в случае использования (2а) не меньше 50 + 80%, что делает использование уравнения (2а) для расчета процессов перемангничивания мало пригодным. По мере увеличения величины перемангнивающего поля  $H$  величина  $M$  уменьшается, причем при  $H \approx 2H_{гр}$  ее значение, как правило, не превосходит 30 + 40%. Некоторыми из факторов, обуславливающих неполное совпадение расчетных данных с экспериментальными, являются следующие:

а) Отличие величин  $\dot{B}_{max расч}$  от  $\dot{B}_{max эксп}$ , во-первых, вызвано представлением зависимости  $\dot{B}_{max эксп}(H)$  динамической характеристикой  $\dot{B}_{max}(H)$ , которая представляет собой некоторую графическую аппроксимацию зависимости  $\dot{B}_{max эксп}(H)$ . Во-вторых, дополнительная ошибка вносится при последующей аппроксимации динамической характеристики  $\dot{B}_{max}(H)$  аналитическим выражением  $\dot{B}_{max расч}(H)$ . Очевидно, что особенно большая ошибка будет иметь место в случае использования (2а), где существенно нелинейный участок кривой  $\dot{B}_{max}(H)$  аппроксимируется прямой линией.

- б) Пренебрежение в (2а) и (2б) неравномерностью перемангничивания сердечника по его радиусу.
- в) Пренебрежение влиянием на процесс перемангничивания поля  $H_{ст}(B)$ , определяемого СПГ.

(В (2а) и (2б) предполагается, что СПГ идеально прямоугольная.)

Приведенные факторы по мере уменьшения величины поля  $H$  сказываются все сильнее и в области полей  $H < H_{гр}$ , их необходимо принимать во внимание. Последние два из приведенных факторов вызывают сдвиг максимума расчетного импульса вправо, в сторону увеличения времени по сравнению с максимумом экспериментального импульса, т.е.

$$t_{\dot{B}_{max расч}} - t_{\dot{B}_{max эксп}} = T > 0 \quad ; \text{ в случае (2а) } T \approx (0,3 + 0,5) \tau_s, \text{ в случае (2б) } T = (0,1 + 0,3) \tau_s.$$

Б. Модель (3) аппроксимирует нелинейный участок кривой  $\dot{B}_{max}(H)$  параболой вида  $\lambda(H - H_0)^\nu$ , что уменьшает по сравнению с (2а) расхождение величин  $\dot{B}_{max расч}(H)$  от  $\dot{B}_{max эксп}(H)$ . Мера отклонения  $M$  в этом случае составляет около 50%, уменьшаясь по мере приближения  $H$  к  $H_{гр}$ . Очевидно, что величина  $M$  зависит в значительной степени от удачного подбора параметров  $\lambda$  и  $\nu$ . Эти параметры, однако, сильно изменяются при небольшом изменении параметров  $r_{m2}$ ,  $H_0$ ,  $H_{гр}$  и  $H_{02}$ . Этот факт затрудняет определение  $\lambda$  и  $\nu$  ввиду того, что  $r_{m2}$ ,  $H_0$ ,  $H_{02}$  и  $H_{гр}$  зависят от выбранной аппроксимации прямолинейной части динамической характеристики. Определение  $\lambda$  и  $\nu$  приходится поэтому проводить вручную, проверяя расхождение кривых  $\dot{B}_{max}(H)$  и  $\dot{B}_{max расч}(H) = \lambda(H - H_0)^\nu$ . Это неудобство устраняется, если аппроксимировать кривую  $\dot{B}_{max}(H)$  отрезками парабол, подобно аппроксимации СПГ. Совпадение импульсов  $\dot{B}_{расч}(t)$  и  $\dot{B}_{эксп}(t)$  улучшается по мере уменьшения отношения внешнего диаметра сердечника к внутреннему, так как в модели (3) также не учтено влияние неравномерного перемангничивания сердечника по радиусу на процесс перемангничивания. Согласно расчету, проведенному в [3], мера отклонения при отношении

внешнего диаметра к внутреннему, равному 1,06, не превышает 10%.

В. Уравнение (5) дает по сравнению с (2а), (2б) и (3) лучшее совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей. Учет СПГ в процессе расчета уменьшает величину  $T$  до значения, не превышающего  $0,1\tau_s$ . При этом  $M \approx 20-30\%$ .

Встречающееся различие между  $\dot{B}_{расч}(t)$  и  $\dot{B}_{эксп}(t)$  вызвано помимо причин, приведенных в п.а, представлением динамической характеристики  $\dot{B}_{max}(H)$  зависимостью

и последующей аппроксимацией этой зависимости прямой линией

$$\frac{\dot{B}_{max\ расч}}{H - H_{cr}(B)} = R_m \{1 + \mu [H - H_{cr}(B)]\}.$$

Г. Расчет процесса перемагничивания, учитывающий разность внешнего и внутреннего радиусов, произведенный для разного числа слоев  $n$ , показал, что удовлетворительного совпадения с экспериментом ( $M \approx 10 + 20\%$ ) достигаем в случае, когда отношение внешнего диаметра к внутреннему для каждого из слоев не превосходит значение 1,1. В данном случае при расчете схем, содержащих сердечники с СПГ, имеется возможность заменять каждый сердечник рядом последовательно включенных сердечников-слоев, процесс перемагничивания каждого из которых описывается уравнением (2б). Кроме того, расчет процесса перемагничивания по программе, приведенной в работе, дает возможность найти параметры динамической характеристики материала.

Программы, составленные в настоящей работе, дают возможность проводить расчет процесса перемагничивания и для более общего случая, когда начальное значение магнитной индукции  $B_H$  отличается от  $-B_r$ . Соответствующие уравнения приведены в [1]. Программа, составленная с учетом неравномерного перемагничивания сердечника по радиусу дает также возможность проводить расчет процесса перемагничивания при  $B_H \neq -B_r$ . Кроме того, имеется возможность учесть способ, каким достигается в сердечнике начальное состояние  $B_H$ .

По программам, приведенным в работе, можно быстро провести расчет процесса перемагничивания и оценить точ-

ность расчета, получаемую для конкретной марки сердечников, при использовании разных аппроксимаций.

2. Во второй части главы I проведен расчет ХП

$$\Delta B_i = f(\Delta B_{i-1})$$

магнитодиодных элементов на ЭЦВМ. Составлены программы на языке АЛГОЛ для случая, когда ХП представлены трансцендентными уравнениями [5]. По приведенным программам производился расчет ХП магнитодиодных элементов дроссельного и трансформаторного типов и полученные ХП сравниваются с экспериментальными. Сравнение показало, что модель (2б), на основании которой были в [5] получены уравнения ХП, можно использовать в случае, когда величина результирующего поля, перемагничивающего управляющие и рабочие сердечники, больше величины  $H_{гр}$ . (При этом напряженность поля, создаваемая тактовым током в управляющих сердечниках, превышает значение  $H_{гр}$  в несколько раз.) В противном случае необходимо использовать более сложные модели перемагничивания сердечников, например (5). В заключение главы I приведены соображения, по которым надо проводить расчет ХП магнитных элементов в случае, когда уравнение, описывающее процесс перемагничивания сердечников, не имеет аналитическое решение. В процессе интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений надо использовать итерационный метод. Приводится способ преобразования исходной системы дифференциальных уравнений, описывающих работу элемента, к системе, для которой обеспечена сходимость итерационного процесса. Однако даже для такого простейшего случая расчета ХП, каким является передача информации от одного сердечника к другому, получаем программу, состоящую из нескольких сотен операторов. На расчет ХП затрачивается много времени (несколько десятков минут на ЭЦВМ "Минск-2"). Более целесообразным поэтому оказывается ХП магнитных логических элементов рассчитывать на аналоговых вычислительных машинах [8], в то время как для расчета процесса перемагничивания сердечника и для проверки различных моделей более целесообразно применение ЭЦВМ, где легче



подготовить исходные данные и провести обработку полученных результатов.

Программы для ЭЦВМ, приведенные в главе I, могут оказать помощь в процессе проектирования магнитных элементов с сердечниками с ППГ, а также в процессе создания и проверки новых моделей процессов перемагничивания. Программы, предназначенные для расчета ХП, дают возможность выяснить качественное и количественное влияние отдельных параметров схемы на ХП и изменять их таким образом в нужном направлении. Требования, предъявляемые к ХП логических элементов, при выполнении которых они пригодны для работы в логических устройствах, рассмотрены во второй части диссертации.

## II.

Располагая характеристиками передачи цифровых элементов, можно проводить анализ функциональной устойчивости логических схем, построенных на этих элементах. Выше говорилось, что вопросы функциональной устойчивости играют очень важную роль, особенно для ЛЭ промышленной автоматики, поскольку отказ или ошибка в работе логической схемы может привести в промышленном процессе к серьезным последствиям. В связи с этим появляются вопросы о том, каким образом определить принципиальную возможность функционально устойчивой работы ЛЭ некоторого логического комплекса или ЛЭ разных комплексов в сложных логических схемах, каким образом выбирать допустимые уровни входных и выходных сигналов ЛЭ комплекса, чтобы по возможности обеспечить наибольшую возможную величину устойчивости схем к сигналам помехи, такие принципы положить в основу контроля ЛЭ, и т.д. При анализе функциональной устойчивости необходимо уметь определять такие ХП логических элементов, которые характеризуют наиболее неблагоприятные режимы при совместной работе ЛЭ в схемах. Кроме того, в процессе проектирования важно знать,

какие требования необходимо предъявлять к взаиморасположению характеристик передачи разных ЛЭ комплекса, при котором весь комплекс будет обладать требуемой величиной устойчивости к сигналам помех. Решению поставленных вопросов, касающихся функциональной устойчивости ЛЭ (независимо от физических принципов их действия) при их работе в сложных логических схемах, посвящена вторая часть диссертации, включающая главы II, III и IV.

I. Вторая глава настоящей работы ставит своей целью нахождение оптимальных точек контроля характеристик передачи и определяемых ими оптимальных величин допустимых входных сигналов ЛЭ.

Любой элемент, реализующий функцию алгебры логики от  $m$  переменных, можно представить поверхностью передачи в  $(m + 1)$ -мерном пространстве, по  $m$  координатным осям которого выносим нормированные (по отношению к некоторому расчетному значению) величины входных сигналов  $X_1, X_2, \dots, X_m$  и по  $(m + 1)$ -й оси которого выносим нормированную величину выходного сигнала  $Y$ . Чтобы провести анализ функциональной устойчивости логических схем, требуется в общем случае рассмотреть поверхности передачи (ПП) элементов, на которых схемы построены. Рассмотрение ПП, однако, практически затруднено, так как неизвестно их аналитическое описание. Поэтому желательно заменить ПП некоторой группой характеристик на плоскости, анализ которых привел бы с точки зрения функциональной устойчивости к тем же результатам, что и анализ ПП в целом. Очевидно, что ПП должна быть заменена группой таких характеристик передачи, которые определяют наиболее неблагоприятные режимы ЛЭ в схемах (когда опасность самопроизвольной генерации сигналов, принадлежащих подмножеству сигналов единицы, или затухания сигналов единицы является наибольшей). Способ замены поверхностей передач логических элементов совокупностью эквивалентных с точки зрения функциональной устойчивости ХП на плоскости приводится в главе III.

Заменяем поверхности передачи всех типов ЛЭ, входящих в некоторый комплекс элементов, группами повторительных

или инверторных ХП и наложим полученные ХП друг на друга. В результате получаем 2 области – область повторительных и область инверторных ХП. Назовем повторителем (инвертором) некоторый элемент, крайние ХП которого совпадают с огибающими области повторительных (инверторных) ХП. Как показано в диссертации, такой переход от конкретных ЛЭ к представляющим их повторителям и инверторам дает возможность прогнать анализ функциональной устойчивости сложных логических схем независимо от конкретной функции алгебры логики, которую они реализуют, и, следовательно, независимо от конфигурации ЛЭ в схемах. Обозначим левую и правую огибающие области повторительных характеристик через  $\varphi_n(x)$  и  $\varphi_p(x)$ , огибающие инверторных характеристик обозначим через  $\psi_n(x)$  и  $\psi_p(x)$ . Области, ограниченные этими огибающими, учитывают также разброс параметров комплектирующих деталей ЛЭ, изменение параметров этих деталей во времени, режимы работы, в которых будут работать ЛЭ комплекса, влияние окружающей среды и т.п. В случае вероятностного подхода к анализу функциональной устойчивости огибающие  $\varphi_n(x)$ ,  $\varphi_p(x)$ ,  $\psi_n(x)$  и  $\psi_p(x)$  представляют собой некоторые вероятностные характеристики передачи, полученные в процессе вероятностного расчета.

На основании подмножеств входных и выходных сигналов нуля и единицы, которые ставятся в соответствие логическим значениям "0" или "1" инвертора и повторителя, приведены определения помехоустойчивостей передачи сигнала нуля или единицы между двумя повторителями  $A_{\text{ПП}}$  или  $A_{\text{ПП}}$ , помехоустойчивостей передачи сигнала нуля или единицы между двумя инверторами  $A_{\text{ИИ}}$  или  $A_{\text{ИИ}}$ , помехоустойчивостей передачи сигнала нуля или единицы от повторителя к инвертору  $A_{\text{ПИ}}$ ,  $A_{\text{ПИ}}$  и, наконец, помехоустойчивостей передачи сигнала нуля или единицы с инвертора на повторитель  $A_{\text{ИП}}$  или  $A_{\text{ИП}}$ . Показано, что помехоустойчивость при передаче сигнала нуля или единицы в любой из ветвей логической схемы можно представить одной из помехоустойчивостей

$A_{ijk}$  ( $i = \text{П, И}; j = 0, 1; k = \text{П, И}$ ). Мерой устойчивости логической схемы или комплекса ЛЭ называем величину

$$A = \min (A_{\text{ПП}}, A_{\text{ПП}}, A_{\text{ИИ}}, A_{\text{ИИ}}, A_{\text{ПИ}}, A_{\text{ПИ}}, A_{\text{ИП}}, A_{\text{ИП}}). \quad (6)$$

После того как для некоторого комплекса определены области, в которых находятся повторительные и инверторные ХП всех ЛЭ, т.е. известны огибающие  $\varphi_n(x)$ ,  $\varphi_p(x)$ ,  $\psi_n(x)$ ,  $\psi_p(x)$ , детерминированные или вероятностные, можно основные из задач, на которые дан ответ во второй главе, сформулировать следующим образом:

а) определить принципиальную возможность функционально устойчивой работы ЛЭ комплекса или ЛЭ разных комплексов в логических схемах и определить максимальную меру устойчивости  $A = A_M$ , с которой могут работать ЛЭ данного комплекса;

б) выбрать подмножества входных сигналов нуля и единицы ЛЭ комплекса таким образом, чтобы сумма соответствующих этим подмножествам помехоустойчивостей  $A_{ijk}$  ( $i = \text{П, И}; j = 0, 1; k = \text{П, И}$ ) была максимальной, при наибольшей величине наименьшей из помехоустойчивостей, т.е. чтобы

$$A = A_M = \max, \quad (7)$$

$$A_{ijk} \geq 0, \quad (8)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k A_{ijk} = \max. \quad (9)$$

Полученные величины помехоустойчивостей определяют наибольшую допустимую величину сигналов помех, при которой еще не нарушена функциональная устойчивость схем;

в) показать, какие принципы необходимо положить в основу контроля ЛЭ, чтобы схемы, построенные на элементах, прошедших контроль, обладали требуемой величиной меры устойчивости  $A$  (в частности,  $A = A_M$ ).

Каждое из входных подмножеств нормированных сигналов нуля или единицы повторителя или инвертора определяется некоторыми точками  $M, N, P, R$ , которые лежат соответственно на огибающих  $\varphi_n(x)$ ,  $\varphi_p(x)$ ,  $\psi_n(x)$ ,  $\psi_p(x)$ .

Точки  $M, N, P, R$  называем оптимальными, если соответствующие им величины помехоустойчивостей удовлетворяют условиям (7), (8), (9) или хотя бы условиям (7), (8). Если для них выполнено лишь условие (7), то они называются допустимыми. В диссертации приведен итерационный графический метод, позволяющий получить при известных областях повторительных и инверторных ХП оптимальные точки  $M, N, P, R$ , и показано, что эти точки могут служить в качестве точек контроля логических элементов. Для того чтобы ЛЭ комплекса работали в логической схеме с мерой устойчивости, соответствующей полученным оптимальным точкам  $M, N, P, R$ , необходимо, чтобы входные сигналы нуля и единицы элементов принадлежали к подмножествам, которые определяются этими точками, а также чтобы при этом все ЛЭ прошли контроль по точкам  $M, N, P, R$ .

В главе II диссертации приводится также способ определения точек контроля  $M, N, P, R$  для некоторых частных случаев, когда наложены ограничения на соединения инверторных и повторительных элементов, и для случаев, когда в конкретных комплексах ЛЭ по техническим причинам недопустимо последовательное соединение двух ЛЭ повторительного или инверторного типов или когда ЛЭ повторительного типа не обеспечивают при огибающих  $\varphi_n(X)$  и  $\varphi_n(X)$  функционально устойчивую работу. Полученные результаты иллюстрируются на примерах.

Отдельный параграф второй главы посвящен возможности определения точек контроля с помощью вычислительных машин. Приведена математическая формулировка задачи определения оптимальных точек  $M, N, P, R$ . Показано, что такая задача сводится к решению двух задач нелинейного выпуклого программирования. Математическая запись этих задач дает возможность проводить их решение на ЭЦВМ. Решение этих задач на аналоговых вычислительных машинах сводится к решению некоторой эквивалентной градиентной системы дифференциальных уравнений.

Результаты, полученные в главе II, делают возможным:

- а) определить пригодность или непригодность элементов одного или нескольких логических комплексов для совместной работы;

- б) определить подмножества допустимых входных сигналов нуля и единицы ЛЭ комплекса, при которых мера устойчивости произвольной логической схемы будет максимальной, с учетом ограничений на величины выходных сигналов элементов;
- в) определить максимальную величину меры устойчивости  $A_M$ . Последняя представляет собой важную характеристику комплекса ЛЭ;
- г) организовать по найденным оптимальным точкам  $M, N, P, R$  контроль элементов. Такой контроль необходим для того, чтобы мера устойчивости логической схемы, построенной на элементах, прошедших контроль, была при соответствующих точкам контроля подмножествах входных сигналов максимально возможной и равной величине  $A_M$ ;
- д) определить наибольшую меру устойчивости, с которой могут работать логические схемы и соответствующие ей точки контроля, когда на величины входных сигналов наложены дополнительные ограничения.

2. Третья глава диссертации посвящена методике замены поверхностей передачи (ПП) ЛЭ группами эквивалентных (с точки зрения функциональной устойчивости) ХП на плоскости.

Как было сказано выше, для того чтобы провести анализ функциональной устойчивости логических схем, необходимо знать области, в которых находятся все ХП, которые определяют наиболее неблагоприятные режимы работы ЛЭ в схемах. Третья глава посвящена методике определения таких областей.

Переход от ПП к ХП показан на примере ЛЭ, реализующего функцию конъюнкции. Показано, что ПП такого элемента можно представить повторительной областью. Повторительной областью можно представить также ЛЭ, реализующий функцию дизъюнкции. ПП логических элементов, реализующих функции Вебба или Шеффера, можно заменить некоторыми инверторными областями.

В третьей главе рассмотрены далее III элементы, реализующих функции запрета, импликации, равнозначности (эквивалентности) и неравнозначности. Как показано в процессе анализа III этих элементов, для получения эквивалентных III нельзя соответствующие III заменять одними лишь повторительными или инверторными областями. Каждый из элементов надо представлять одновременно и повторительной, и инверторной областями. К такому заключению удалось прийти, благодаря использованию понятия помехоустойчивости передачи сигнала и идей метода определения точек контроля  $M, N, P, R$  (и определяемых ими подмножеств входных сигналов), которые облегчают анализ различных режимов работы ЛЭ. Приведен способ определения огибающих повторительных и инверторных областей для отдельных ЛЭ.

Следовательно, в третьей главе:

а) рассмотрена методика представления поверхностей передачи логических элементов инверторного или повторительного типов некоторыми характеристиками передачи, характеризующими самые неблагоприятные режимы работы элементов в схемах;

б) приведен способ замены поверхностей передачи логических элементов смешанного типа характеристиками передачи на плоскости, анализ которых приводит при рассмотрении функциональной устойчивости к тем же результатам, что и анализ поверхности передачи в целом;

в) рассмотрены поверхности передачи логических элементов, реализующих функции конъюнкции, дизъюнкции, Вебба, Шеффера, запрета, импликации и равнозначности, и приведены соответствующие этим поверхностям характеристики передачи на плоскости.

Метод преобразования поверхностей передачи дает возможность использовать при рассмотрении функциональной устойчивости результаты, полученные в главе II и главе IV.

3. Четвертая глава диссертации посвящена синтезу характеристик передачи логических элементов. Если до начала

проектирования некоторого комплекса ЛЭ задана требуемая величина меры устойчивости комплекса, то желательно знать, какие требования надо при этом предъявлять к форме и взаиморасположению огибающих характеристик передачи ЛЭ инверторного и повторительного типов. Это дает возможность значительно ускорить процесс проектирования элементов, так как известно направление, в котором желательно изменять получаемые ХП. В данной главе сначала сформулированы требования, предъявляемые к ХП отдельно взятых ЛЭ повторительного и инверторного типа. Далее рассматриваются случаи, когда огибающие характеристик передачи ЛЭ инверторного типа известны. При этом предъявлены требования к виду ХП элементов повторительного типа, при выполнении которых весь комплекс будет обладать требуемой мерой устойчивости. В конце главы рассмотрены случаи, когда известны ХП элементов повторительного типа данного комплекса и когда надо найти требования, предъявляемые при этом к ХП проектируемых ЛЭ инверторного типа, чтобы мера устойчивости комплекса была равна данной величине  $A$ . Эти требования сформулированы также для некоторых частных случаев, когда не допускается последовательное соединение в схемах двух повторителей или двух инверторов.

Итак, в четвертой главе показано, какими должны быть ХП повторителей или инверторов, чтобы их мера устойчивости была не меньше требуемой. Сформулированы требования к взаиморасположению и виду ХП повторителей и инверторов, при котором весь комплекс будет обладать требуемой мерой устойчивости. Результаты, полученные в этой главе, облегчают задачу проектирования логических элементов, образующих комплекс с требуемой мерой устойчивости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате настоящей работы:

Составлены программы для расчета на ЭЦВМ процессов переманичивания сердечников с ППГ для наиболее распространенных моделей, аппроксимирующих поверхность динамического состояния сердечника. Приведенные программы можно с небольшими изменениями применить и к моделям, которые будут предложены в будущем. Более того, использование вычислительных машин может оказать ценную помощь в процессе создания самих моделей.

На основе составленных программ проведены расчеты зависимостей  $\dot{V}_{расч}(t)$  и проведено сравнение рассчитанных зависимостей  $\dot{V}_{расч}(t)$  с экспериментальными.

Составлена программа и приведен способ расчета процесса переманичивания, учитывающий отношение внешнего диаметра сердечника к внутреннему.

Приводятся программы для расчета характеристик передачи магнитодиодных элементов, когда эти характеристики представлены трансцендентными уравнениями.

Показано, к какой системе дифференциальных уравнений необходимо приводить задачу расчета переходных процессов или характеристики передачи магнитных схем в случае, когда процессы переманичивания имеющих в них сердечников описываются дифференциальными уравнениями, аналитическое решение которых отсутствует.

Приведен способ представления поверхности передачи логических элементов при анализе их функциональной устойчивости в схемах группами инверторных или повторительных характеристик передачи.

Определяется принципиальная возможность функционально устойчивой работы логических схем, составленных из логических элементов, характеристики передачи которых находятся в известной области.

Дан способ определения максимально возможной меры устойчивости логических элементов комплекса при наихудшем сочетании их характеристик передачи.

Рассмотрен способ выбора подмножеств допустимых входных и выходных сигналов, которые являются необходимой предпосылкой того, чтобы логические элементы в схемах работали совместно с наибольшей возможной мерой устойчивости.

Приведен способ определения точек контроля характеристик передачи логических элементов. Для того чтобы элементы могли совместно работать в логических схемах с мерой устойчивости, величина которой определяется также точками контроля, необходимо, чтобы все элементы прошли контроль по полученным точкам.

Сформулированы требования к взаиморасположению областей инверторных и повторительных характеристик передачи логических элементов, при выполнении которых весь комплекс будет обладать требуемой мерой устойчивости.

Результаты, полученные в настоящей работе, облегчают расчет переходных процессов в магнитных схемах, задачи анализа функциональной устойчивости логических схем, синтеза и контроля логических элементов, образующих комплекс, обладающий требуемой величиной меры устойчивости.

---

Результаты настоящей работы доложены на конференции молодых специалистов Института автоматки и телемеханики (тк) и на семинаре кафедры инженерной электрофизики Московского энергетического института.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. ПИРОГОВ А.И., ШАМАЕВ Ю.М. Магнитные сердечники в автоматике и вычислительной технике. М., изд-во "Энергия", 1967.
2. РОЗЕНБЛАТ М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М., изд-во "Наука", 1966.
3. NITZAN D. Computation of Flux Switching in Magnetic Circuits. IEEE Trans. on Magnetics, Sept. 1965, vol. MAG-1, No. 3.
4. КОПОРСКИЙ А.С. Анализ и расчет накопительных трансформаторов на ферритовых сердечниках с ППГ. Диссертация, МЭИ. М., 1964.
5. ВАСИЛЬЕВА Н.П. Функциональная устойчивость и основы проектирования систем магнитных логических элементов промышленной автоматики. Диссертация, ИАТ(ТК) АН СССР. М., 1967.
6. ШАМАЕВ Ю.М. Магнитные и накопительные логические элементы цифровых устройств. Сб. "Магнитные цифровые элементы". М., изд-во "Наука", 1967.
7. БРИН И.Н., ШАМАЕВ Ю.М. Передача двоичной информации по регистру сдвига. "Автоматика и телемеханика", 1965, № 5.
8. БАЛАШОВ Е.П., СИДОРОВ В.М., ХАБИБ А.Ф. Повышение надежности магнито-полупроводниковых элементов на этапе проектирования. Известия ЛЭИ им.В.И.Ульянова (Ленина), 1968, вып.67.