

УДК 629.7.03.001

Н.Н. Савчук

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрены проблемные вопросы структурного синтеза электронной системы управления динамическими процессами на основе метода подсхем. Предложена структура электронной схемы управления возвратно-поступательным движением якоря электрического двигателя.

Знание точного математического описания отдельных электронных устройств и сложных динамических систем имеет принципиальное значение в процессе сертификации такого класса систем. Нет необходимости доказывать насколько это важно, когда электронная система управляет процессами передачи и преобразования энергии, летательным аппаратом или комплексным тренажером [1; 2].

Предполагается, что электронная система описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, и исследуемый объект является устойчивым. Рассмотрим класс электронных систем, которые представляются в форме дифференциального уравнения

$$a_3 \frac{d^3 y_1(t)}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy_1(t)}{dt} + a_0 y_1(t) = b_1 \frac{dy_{\text{вх}}(t)}{dt} + b_0 y_{\text{вх}}(t),$$

где коэффициенты a_i, b_j ($i=0,1,2,3; j=0,1$) известны; $y_1(t), y_{\text{вх}}(t)$ – соответственно выходная и входная величины системы.

Представив это уравнение по Лапласу при нулевых начальных условиях, определим форму его решения в общем виде:

$$Y_1(p) = \frac{b_1 p + b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} Y_{\text{вх}}(p) = F(p) * Y_{\text{вх}}(p),$$

где $F(p)$ – передаточная функция электронной системы.

Функции электронных систем с сосредоточенными параметрами являются дробно-рациональными функциями комплексной частоты:

$$F(p) = \frac{\sum_{j=0}^n b_j p^j}{\sum_{i=0}^m a_i p^i} = H * \prod_{j=1}^n (p - p_{0j}) / \prod_{i=1}^m (p - p_{ni}),$$

где коэффициенты a, b и H – вещественные числа, а комплексные величины p_{0j} и p_{ni} называемые соответственно нулями и полюсами функции, равны корням ее числителя и знаменателя. Корни таких функций располагаются только на вещественной оси комплексной переменной p или попарно-симметрично ей, а полюсы – только слева от оси $j\omega$. Расположение хотя бы одного полюса в правой полуплоскости соответствует самовозбуждению, при котором электронная система переходит в нелинейный режим.

Задача синтеза множества структур электронной системы формулируется следующим образом.

Необходимо идентифицировать множество структур электронной системы, для которой известны порядок и коэффициенты дифференциальных уравнений и можно измерить входные и выходные величины. Для решения этой задачи вводим множественную модель структуры электронной системы в виде отношения на множествах узлов и ветвей.

Исходная система S рассматривается как бинарное отношение на множествах пар узлов $\{x_i, x_j\} \in X_x$ и типов ветвей $q_i \in Q$ [3]. В множественной модели электронной системы, кроме формулы $S \subset X_x \times Q$, используется функция $f_1 = S \Leftrightarrow N$, где N – множество номиналов двухполюсных компонент системы. Направление двухполюсника представляется порядком узлов в паре $\{x_i, x_j\}$ и фиксируется только для активных и зависимых компонент. Компоненты системы можно перечислить по парам узлов. Однако для различия параллельных ветвей и оформления указателей в механизме алгоритмов введено множество V и функция $f_2 = S \Leftrightarrow V$.

Для подмножеств исходного множества S и коэффициентов $a_i \in \{a\}$, $b_i \in \{b\}$ полиномов заданной функции $F(p)$ комплексной переменной устанавливается отношение взаимно-однозначного соответствия. В системе отношений

$$\begin{aligned} \sum S_a &\leftrightarrow a_i \in \{a\}, \\ \sum S_b &\leftrightarrow b_i \in \{b\}, \end{aligned} \quad (1)$$

неизвестной является структура электронной системы S , определенной как бинарное отношение на множествах узлов и двухполюсников. Операция суммирования выполняется на множествах эквивалентных подсхем $S_a \in A$, $S_b \in B$, которые представляют классы A , B . Тип передаточной функции накладывает определенные условия на правило формирования подсхем $S_a \in A$, $S_b \in B$.

Рассмотрим формальные правила структурного синтеза электронных систем, удовлетворяющих заданной передаточной функции $F(p)$ с характеристическим полиномом $a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0$.

Утверждение 1. В системе отношений (1), следуя методу узловых потенциалов, должны обязательно существовать подсхемы:

$$S_a^0 \in A_0, S_a^1 \in A_1, S_a^2 \in A_2 \text{ и } S_a^3 \in A_3,$$

которые образуют классы A_0, A_1, A_2, A_3 , удовлетворяющие критериям эквивалентности $\xi \in \{\xi\}$. В данном случае элементы множества $\{\xi\} = \{3, 2, 1, 0\}$ представляют показатели степени комплексной переменной p характеристического полинома передаточной функции.

Подсхемы $S_a^0 \leftrightarrow a_0$, $S_a^1 \leftrightarrow a_1$, $S_a^2 \leftrightarrow a_2$ и $S_a^3 \leftrightarrow a_3$ являются деревьями и булева сумма $S_a^0 \cup S_a^3$ определяет множество S .

Деревом структуры S является подмножество, совпадающее с исходной структурой на множестве узлов и имеющее число ветвей на единицу меньше числа узлов, а также удовлетворяющее условию связности ветвей.

Такое определение дерева позволяет для заданного числа и типа ветвей определить множество узлов и формализовать синтез структур электронных систем, удовлетворяющих заданной передаточной функции $F(p) = (b_1 p + b_0) / (a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0)$.

Для реализации полинома третьего порядка знаменателя функции $F(p)$ необходимо построить хотя бы одну подструктуру S_a^0 (предел слева) и подструктуру S_a^3 (предел справа). Для выбора типа ветвей синтезируемой структуры приведем заданный полином $a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0$ к удобному виду. Если числитель и знаменатель передаточной функции умножить на p' , то полином знаменателя примет вид: $a_3 p^2 + a_2 p^1 + a_1 p^0 + a_0 p^{-1}$ со следующим множеством критериев эквивалентности: $\{\xi\} = \{-1, 0, 1, 2\}$.

Из метода узловых потенциалов следует, что для идеального конденсатора критерий эквивалентности равен единице, критерий эквивалентности идеальной катушки - минус единице, а критерий эквивалентности резистора - нулю.

Утверждение 2. Элементы $\xi_1 = -1$ (предел слева) и $\xi_4 = 2$ (предел справа) множества $\{\xi\}$ однозначно определяют тип, число ветвей и число узлов синтезируемой структуры.

Доказательство. Для реализации этой структуры необходимо выбрать катушку с индуктивностью L_1 , которая обеспечит в дереве (предел слева) критерий эквивалентности $\xi_1 = -1$, а также два конденсатора емкостью C_1, C_2 с критерием эквивалентности $\xi_4 = 2$ для соответствующего дерева (предел справа). Следовательно, по определению дерева, чтобы из трех ветвей построить дерево требуется четыре узла из множества X .

На множестве узлов X определим декартово произведение, которое дает все множество пар узлов $X_X = X \times X$ (рис. 1). В этом множестве исключаем диагональные элементы и рассматриваем реализацию структур на подмножестве пар узлов $X_S \subset X_X$ выше главной диагонали. Элементам $\{x_i, x_j\} \in X_S$ ставится в соответствие только один параметр $q_i \in Q$. Множество параметров $Q_M = \{C_1, C_2, L_1\}$ ветвей реактивной части электронной системы жестко определено пределами справа и слева в соответствии с заданным полиномом передаточной функции. Это множество необходимо дополнить резистивной частью Q_R до множества $Q = Q_M \cup Q_R$.

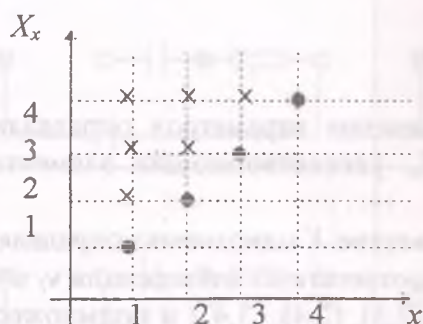


Рис. 1

Подмножество Q_R параметров ветвей резистивной части определяется предельным критерием эквивалентности $\xi_4 = 2$ для дерева электронной системы с двумя конденсаторами и предельным критерием $\xi_1 = -1$ для дерева электронной системы с одной катушкой. Для реализации дерева синтезируемой электронной схемы с одной катушкой индуктивности на заданном множестве узлов $X = \{1, 2, 3, 4\}$ с числом узлов $n = 4$ требуется подмножество параметров $Q_R = \{R_1, R_2\}$ двух резистивных ветвей схемы, что однозначно следует из определения дерева. Тогда все множество параметров $Q = \{C_1, C_2, L_1, R_1, R_2\}$.

Рассмотрим методику структурного синтеза электронной системы из сформированного множества X для заданных узлов: входного x_i , выходного x_j и базисного x_β . из сформированного множества X .

На заданном множестве узлов X и множестве параметров Q формируем подсхемы $S_b \leftrightarrow b_i \in \{b\}$ с заданными входным x_i , выходным x_j и базисным x_β узлами в множестве X , удовлетворяющие полиному числителя передаточной функции $F(p)$ с подмножеством критериев эквивалентности $\{0, -1\}$. По методу узловых потенциалов каждая подсхема S_b должна дать поддеревья, удовлетворяющие критериям эквивалентности из множества $\{0, -1\}$. Для дополнения подсхемы S_b до дерева вводится фиктивный источник между выходным и базисным узлами. При реализации подсхем S_b необходимо соблюдать правило, которое иллюстрирует рис. 2. Каждая подсхема S_b должна содержать пути $P_i \subset S_b$ с заданным источником x_i и стоком x_j . В подмножество узлов P_i не должен входить базисный узел x_β . Минимальное число подмножеств P_i определяется числом элементов в множестве $\{0, -1\}$.

Для структур необходимо задать функцию распределения элементов множества $Q = \{C_1, C_2, L_1, R_1, R_2\}$ по ветвям структур. Эта функция должна обеспечить соблюдение

критериев эквивалентности $\{0, -1\}$ для каждого $P_i \subset S_b$. Формирование подструктур P_i с функцией распределения параметров показано на рис. 3.

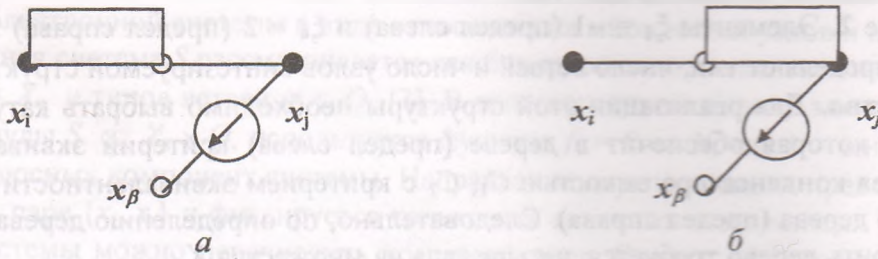


Рис. 2



Рис. 3

Подсхемы S_b (рис. 3) с заданной функцией распределения параметров определяют структурный базис формирования множества структур S_a , удовлетворяющих элементам множества ξ .

Подмножество (см. рис. 1) пар узлов $X_S \subset X_X$ на множестве X однозначно определяет граф-схему (рис. 4), на которой каждой паре узлов $\{x_i, x_j\}$ соответствует инциденция $v_i \in V$. Для заданного множества пар узлов $X_S = \{(1,2), (1,3), (1,4), (2,3), (2,4), (3,4)\}$ и подмножества параметров $Q_1 = \{C_1, C_2, R_1\}$ и $Q_2 = \{L_1, R_1, R_2\}$ генерируем элементы класса (рис. 5), удовлетворяющие критерию эквивалентности $\xi_4 = 2$.

Класс деревьев $D_i \in K_4$ с критерием эквивалентности $\xi_4 = 2$ генерируется на основе подсхем S_b , удовлетворяющих полиному $b_1 p + b_0$. Приоритетом при генерации деревьев D_i класса K_4 обладают ветви подсхемы S_b . Каждое дерево D_i класса K_4 фиксировано на подмножестве узлов для одной или более ветвей подсхемы S_b .

Класс деревьев $D_i \in K_1$ с критерием эквивалентности $\xi_1 = -1$ генерируется на основе подсхем S_b (рис. 6). При этом хоть одна ветвь подсхемы S_b должна войти в дерево D_i класса K_1 .

Текущая схема S формируется в результате объединения деревьев $D_i \in K_1$ из класса K_1 и $D_j \in K_4$ из класса K_4 по формуле $S = D_i \cup D_j$.

При объединении деревьев D_i и D_j , являющихся элементами классов K_1, K_4 , фиксируется только такая текущая схема S , которая обязательно включает подсхему S_b .

Рассмотрим применение изложенного подхода для синтеза структуры генератора импульсов тока, предназначенного для управления двигателем возвратно-поступательного движения. На рис. 7 изображены кривые, характеризующие законы изменения токов и напряжений в генераторе (1, 2 – ток в обмотках возбуждения; 3, 4 и 5 – напряжения соответ-

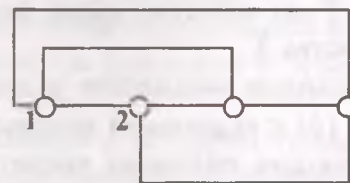


Рис. 4

венно на накопительных и коммутирующем конденсаторе). Необходимо синтезировать схему генератора сигналов для управления двигателем.

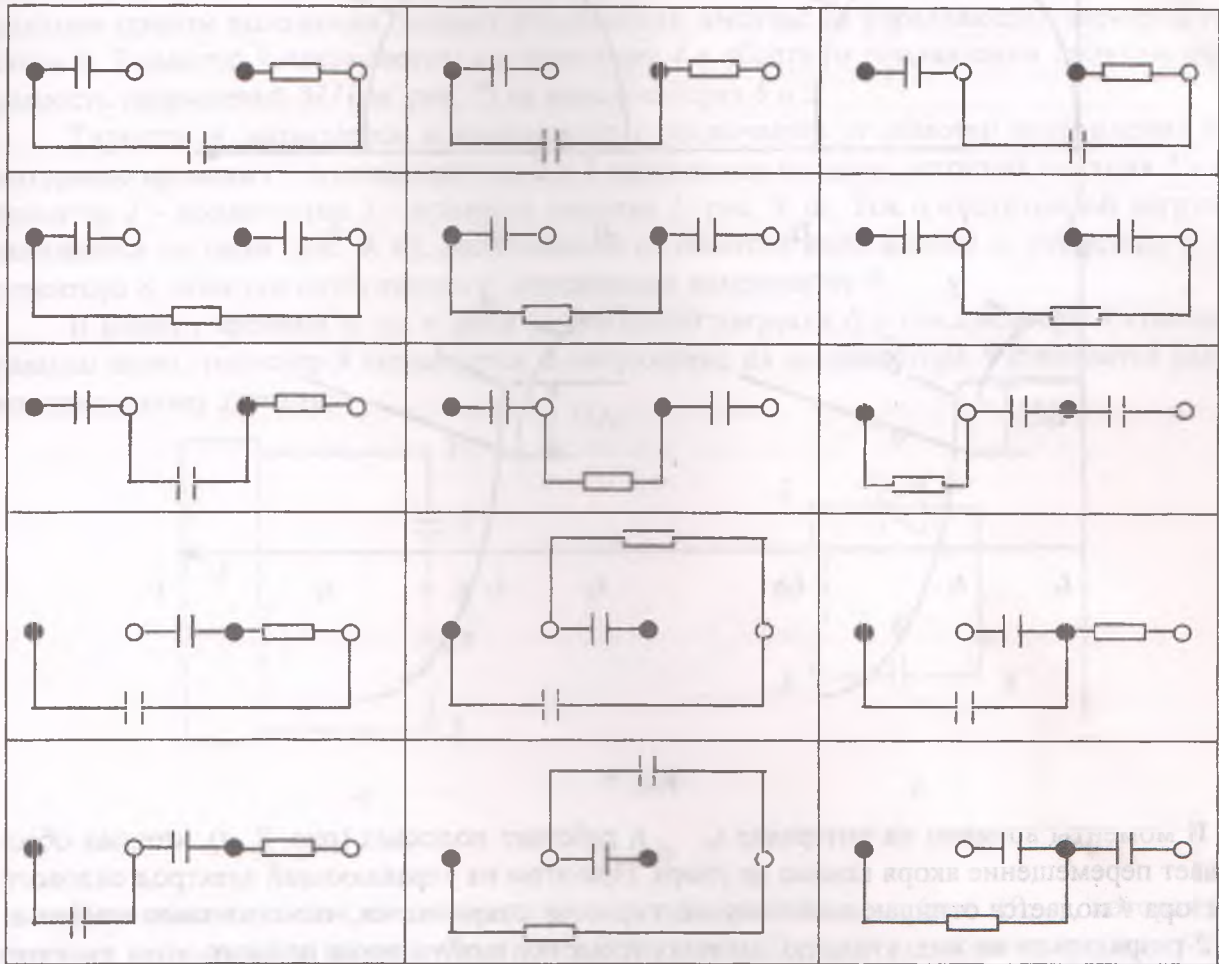


Рис. 5

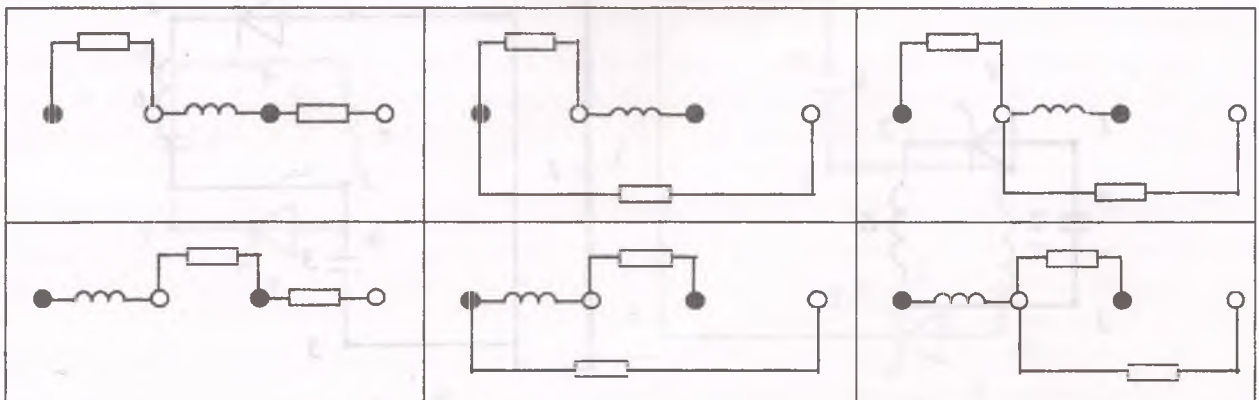


Рис. 6

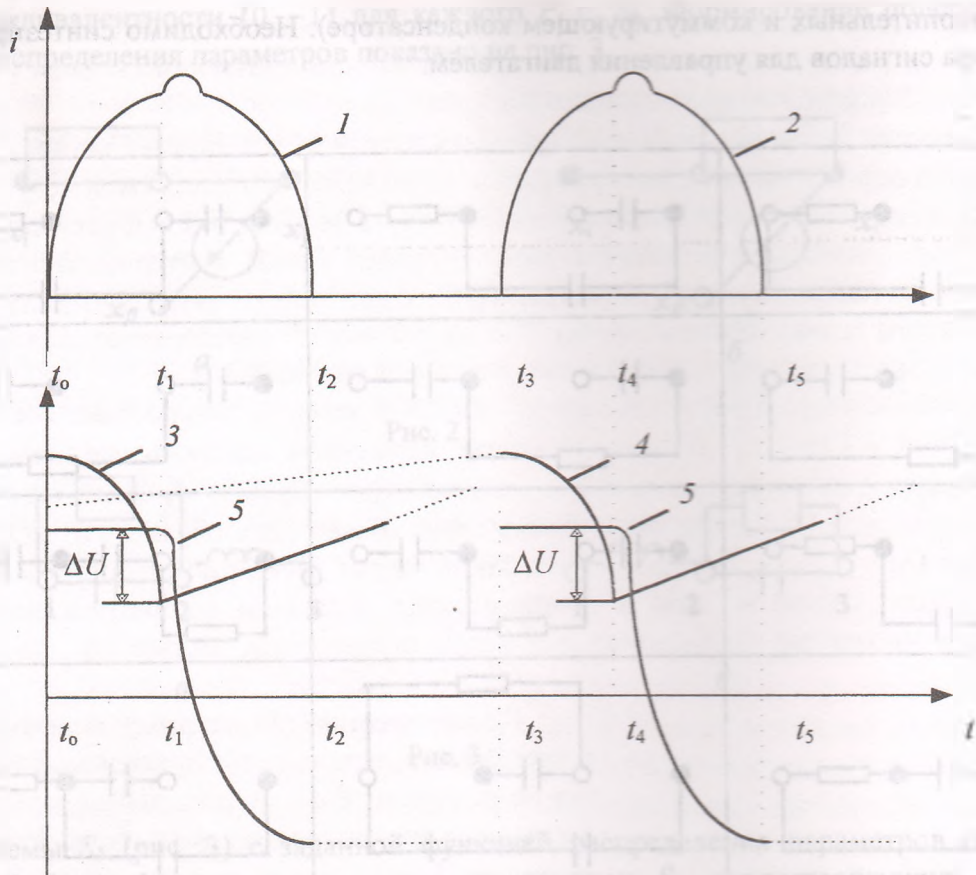


Рис. 7

В моменты времени на интервале $t_0 \dots t_1$ работает подсистема (рис. 8, а), которая обеспечивает перемещение якоря вправо до упора. При этом на управляющий электрод силового тиристора 4 подается отпирающий импульс, тиристор открывается, что позволяет конденсатору 2 разрядиться на индуктивную нагрузку (обмотку возбуждения прямого хода двигателя). Одновременно с разрядом конденсатора 2 происходит дополнительный заряд накопительного конденсатора 3 по цепи: источник питания 1, тиристор 4, индуктивная нагрузка 6, конденсатор 3, источник питания 1 (рис. 8, б). При этом ток i_1 в индуктивной нагрузке 6 нарастает, изменяясь по закону, описываемому кривой 1. В короткозамкнутом витке якоря, магнитосвязанном с обмоткой 6, индуцируется (наводится) вторичный ток i_2 .

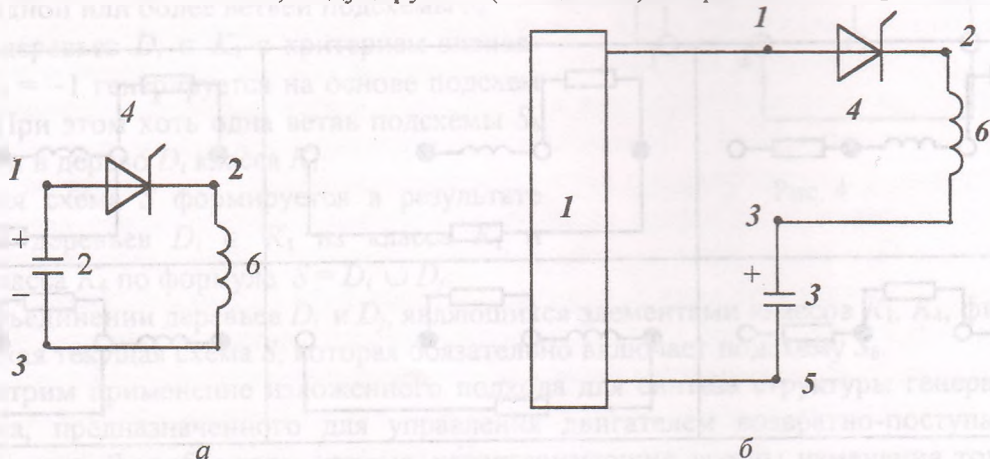


Рис. 8

В результате взаимодействия двух контуров с токами i_1 и i_2 возникает электромагнитная сила, ускоряющая и перемещающая якорь двигателя вправо до упора.

В моменты времени на интервале $t_1 \dots t_2$ работает подсистема, которая позволяет форсировать процесс гашения поля двигателя. В момент времени $t = t_1$, когда якорь окажется в крайнем правом положении, подают отпирающий импульс на управляющий электрод тиристора 9. Тиристор 9 открывается, а к тиристорам 4 в обратном направлении прикладывается разность напряжений ΔU (см. рис. 7) на конденсаторах 8 и 2.

Тиристор 4 закрывается, а конденсатор 2 отключается от обмотки возбуждения 6. На интервале времени $t > t_1$ конденсаторы 2 и 3 заряжаются по цепи: источник питания 1 – конденсатор 2 – конденсатор 3 – источник питания 1 (рис. 9, а). Ток i_1 индуктивной нагрузки 6 замыкается по цепи (рис. 9, б), составленной из обмотки возбуждения 6, тиристора 9, конденсатора 8, обмотки возбуждения 6, перезаряжая конденсатор 8.

В момент времени t_2 ток в цепи индуктивной нагрузки 6 и конденсатора 8 становится равным нулю, тиристор 9 закрывается, а напряжение на конденсаторе 8 становится равным максимальному значению.

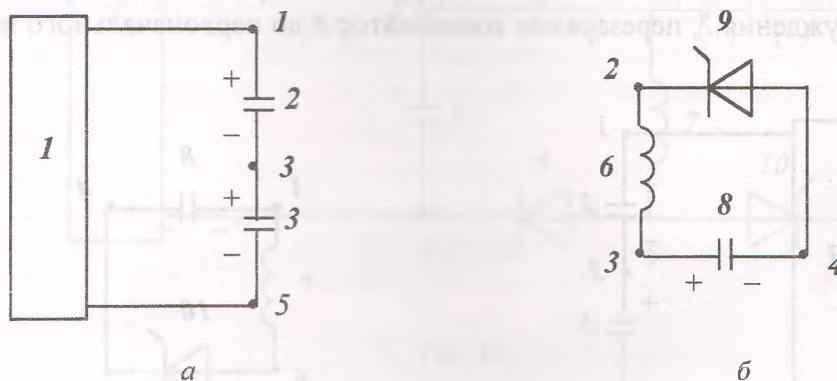


Рис. 9

В моменты времени на интервале $t_2 \dots t_3$ работает подсистема (рис. 10, а), которая обеспечивает перемещение якоря в обратном направлении. Для этого в момент времени t_3 подают отпирающий импульс на управляющий электрод силового тиристора 5. Тиристор 5 открывается, обеспечивая на интервале времени $t_3 \dots t_4$ разряд накопительного конденсатора 3 на индуктивную нагрузку 7 (обмотку возбуждения обратного хода якоря двигателя). Одновременно происходит подзарядка накопительного конденсатора 2 по цепи: источник питания 1, конденсатор 2, индуктивная нагрузка 7, тиристор 5, источник питания 1 (рис. 10, б).

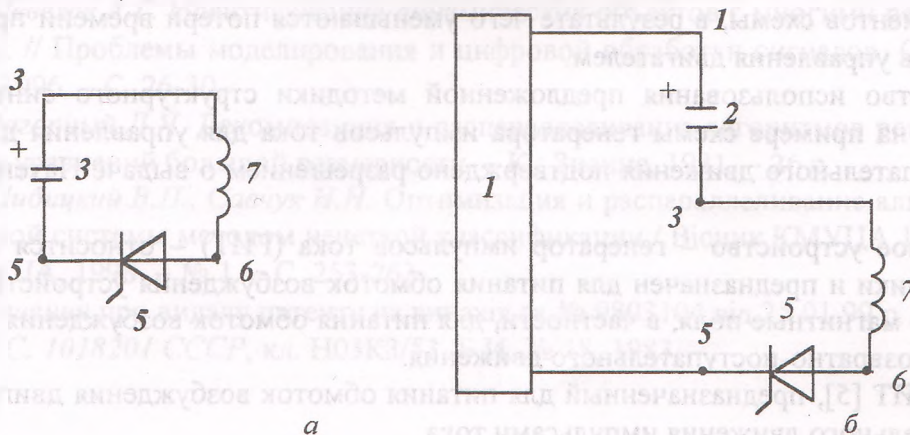


Рис. 10

Ток i_1 индуктивной нагрузки 7 нарастает по кривой 2, а энергия конденсатора 3 преобразуется в электромагнитную энергию обмотки возбуждения 7. В результате этого в короткозамкнутом витке якоря, магнитосвязанном с обмоткой 7, наводится вторичный ток i_2 . Взаимодействие двух контуров с токами i_1 и i_2 обуславливает возникновение электромагнитной силы, перемещающей якорь двигателя с короткозамкнутым витком влево до упора и обеспечивающий тем самым обратный ход якоря.

В моменты времени на интервале $t_4 \dots t_5$ работает подсьема, которая позволяет обеспечить форсировку гашения поля двигателя. В момент времени $t = t_4$ подают отпирающий импульс на управляющий электрод вспомогательного тиристора 10. Тиристор 10 открывается, а к тиристор 5 в обратном направлении прикладывается разность напряжений ΔU на конденсаторах 8 и 3.

Тиристор 5 закрывается, обмотка возбуждения обратного хода 7 отключается от конденсатора 3. На интервале времени $t > t_4$ конденсаторы 2 и 3 заряжаются по цепи: источник питания 1 – конденсатор 2 – конденсатор 3 – источник питания 1 (рис.11, а). Ток обмотки возбуждения 7 перехватывается в цепь (рис. 11, б), состоящую из тиристора 10, конденсатора 8, обмотки возбуждения 7, перезаряжая конденсатор 8 до первоначального потенциала.

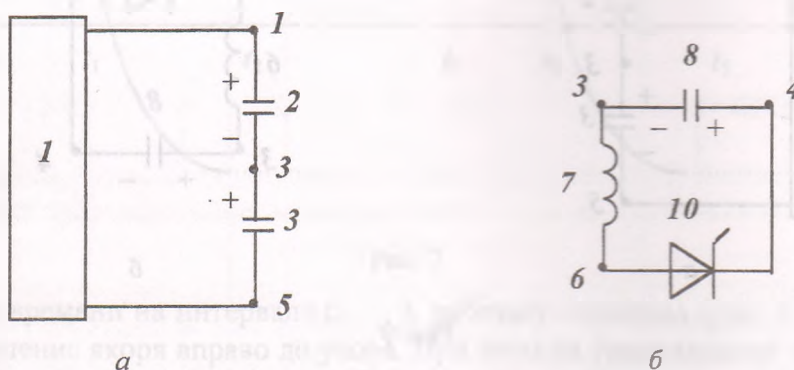


Рис. 11

Объединив подсьемы на рис.8–11, получим схему генератора импульсов тока для управления двигателем возвратно-поступательного движения (рис. 12).

Предлагаемая схема управления двигателем возвратно-поступательного движения позволяет обеспечить повышение частоты срабатывания двигателя, что влечет за собой повышение коэффициента полезного действия. Это достигается благодаря более эффективному соединению элементов схемы, в результате чего уменьшаются потери времени при формировании сигналов управления двигателем.

Преимущество использования предложенной методики структурного синтеза электронных систем на примере схемы генератора импульсов тока для управления двигателем возвратно-поступательного движения подтверждено разрешением о выдаче Патента Украины [4].

Предлагаемое устройство – генератор импульсов тока (ГИТ) – относится к области импульсной техники и предназначен для питания обмоток возбуждения устройств, создающих импульсные магнитные поля, в частности, для питания обмоток возбуждения реверсивного двигателя возвратно-поступательного движения.

Известен ГИТ [5], предназначенный для питания обмоток возбуждения двигателя возвратно-поступательного движения импульсами тока.

Недостатком известного генератора является то, что он содержит большое число диодов, индуктивностей и индуктивно-связанных обмоток, рекуперация неиспользованной

энергии осуществляется через индуктивно-связанные обмотки трансформатора в накопительный конденсатор. Все это усложняет конструкцию и снижает КПД.

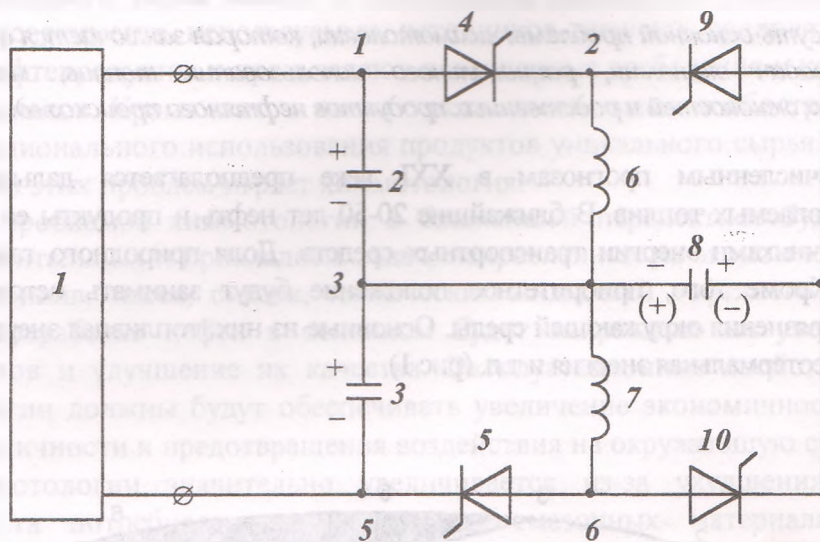


Рис. 12

Предлагаемая методика структурного синтеза основана на методе подсхем и позволяет сократить число двухполюсных компонент в классах индуктивных, емкостных и резисторных структур, а также в целом оптимизировать переходные процессы в электронной системе управления и повысить частоту работы устройства.

Список литературы

1. Шевелев А.Г. Идентификация динамических объектов с многими регулируемыми величинами. // Проблемы моделирования и цифровой обработки сигналов: Сб. науч. тр. – К.: КМУГА, 1996. – С. 26-30.
2. Нагорный Л.Я. Декомпозиция и распараллеливание алгоритмов решения систем нелинейных уравнений большой размерности. – К.: Знание, 1981. – 26 с.
3. Шибичкий В.П., Савчук Н.Н. Оптимизация и распараллеливание алгоритмов анализа электронной системы методом нечеткой классификации / Вісник КМУЦА 1: Зб. наук. праць. – К.: КМУЦА, 1998. – № 1. – С. 253-263.
4. Рішення про видачу патенту на винахід за № 9803104 від 25.01.99 р.
5. А.С. 1018201 СССР, кл. Н03К3/53, Б.И. № 18, 1983.

Стаття надійшла до редакції 21 грудня 1999 року.