

Харьковский политехнический институт

ФОРСИРОВАННЫЕ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Харьков - 1994 г.

621.3-1

Харьковский политехнический институт

На правах рукописи

КЛИМЕНКО БОРИС ВЛАДИМИРОВИЧ

ФОРСИРОВАННЫЕ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

05.09.06 Электрические аппараты

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Харьков - 1994 г.

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Харьковском политехническом институте.

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00801584 (Q)

Официальные оппоненты:

1. член-корр. АН Украины, доктор технических наук, профессор  
Божко Александр Евгеньевич,
2. доктор технических наук, профессор Копыл Виталий Кириллович,
3. доктор технических наук, профессор Власов Константин Петрович.

Ведущая организация - Научно-производственное объединение  
"Харьковский электромеханический завод",  
г. Харьков.

Защита состоится "16" ИЮНЯ 1994 года на заседании  
специализированного ученого совета Д 02.09.02 в Харьковском  
политехническом институте (310002, г.Харьков; ул.Фрунзе, 21).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского  
политехнического института (310002, г.Харьков, ул.Фрунзе, 21).

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1994 г.

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета

Батыгин Ю.В.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Уровень автоматических систем, используемых в производственных процессах, научных исследованиях, транспорте, связи, бытовой и пр. технике, в значительной мере определяется характеристиками электрических аппаратов и устройств автоматики, в которых широко используются электромагниты постоянного и переменного тока в качестве приводов различных исполнительных элементов. Масса электромагнитного привода составляет 20-50% общей массы многих аппаратов и устройств.

Электромагниты постоянного тока просты по конструкции, имеют высокую надежность и износостойкость, но проигрывают электромагнитам переменного тока по быстрдействию, габаритам и массе. Для уменьшения габаритов, массы и энергопотребления, а также повышения быстрдействия электромагнитов постоянного тока применяют форсированное управление, при котором в период срабатывания по обмоткам электромагнитов пропускают токи, превосходящие значения, допустимые по нагреву в номинальном режиме, а после срабатывания токи уменьшают до допустимых значений. Применение форсированного управления позволяет уменьшить массу электромагнитных приводов на 30 - 40%, а расход обмоточной меди снизить на 50 и более процентов.

Не случайно поэтому вопросам форсированного управления электромагнитами посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов. Абсолютное большинство опубликованных по вопросам форсировки работ представляют собой журнальные статьи, патенты и авторские свидетельства. В 1973 г. была опубликована книга Б.Э. Коца, посвященная вопросам форсировки. Значительное количество работ по данному вопросу, появившихся после 1973 г. нашло отражение в монографии автора [5], опубликованной в 1989 г.

В СССР форсированные электромагниты использовались в основном, когда к аппаратам и другим устройствам предъявлялись жесткие требования в части габаритов и массы (контакторы КМ) или когда аппараты работали в условиях низкой частоты коммутаций при относительно низких требованиях к механической износостойкости (контакторы КЛ7, КЛ207). Западные фирмы применяли и применяют форсированные электромагнитные системы в аппаратуре общепромышленного применения, работающей в условиях больших частот коммутаций при больших значениях механической износостойкости, а также находят им нетрадиционные применения (например, электромагнитные форсунки двигателей внутреннего сгорания).

Особую актуальность форсированное управление приобрело в по-

следние годы в связи с резким удорожанием материалов (в первую очередь меди) и электроэнергии. За рубежом форсированное управление приводными электромагнитами контакторов применяют ведущие электротехнические фирмы, такие как Siemens, AEG, Klockner-Muller (Германия), Unelec, TE (Франция), Fuji (Япония), Ansaldo, CGE (Италия), Iskra (Югославия), CEZ (Чехия), LANZ (Венгрия), РЕСПРОМ (Болгария) и др.

После образования СНГ ряд фирм стран содружества приступил к разработке новой электрической аппаратуры. В частности, в АО ЭНАС (Украина, Харьков) ведется разработка ряда серий контакторов постоянного и переменного тока, в которых применяются форсированные электромагнитные системы, разработанные при участии автора данной работы.

Разработка новых серий аппаратов с форсированным управлением потребовала создания алгоритмов и программ расчета форсированных электромагнитных систем. В связи с этим возникла необходимость разработки методов, использующих зависимости, которые наиболее строго описывают реальные физические процессы в таких объектах и основываются на минимальных допущениях. Такие методы, как правило, основываются на решении дифференциальных уравнений магнитных и тепловых полей и требуют значительного объема вычислений. Возможность строгого аналитического решения таких задач является чрезвычайно редкой даже при значительных допущениях, вводимых при постановке задач расчета. Применение численных или комбинированных (численно-аналитических) методов с использованием современных быстродействующих компьютеров позволяет получить решение многих прикладных задач в практически приемлемые сроки.

При разработке методов расчета форсированных электромагнитных систем автор ориентировался на вычислительные возможности современных компьютеров и опирался на труды известных ученых Р.Л. Аронова, А.Я. Буйлова, В.К. Буля, М.А. Витенберга, В.А. Говоркова, А.В. Гордона, В.И. Коваленкова, М.А. Любчика, К.К. Намитокова, А.Г. Никитенко, Г.Н. Петрова, И.И. Пеккера, А. Пика, Г. Ротерса, А.Г. Сливинской, Б.С. Сотскова, внесших значительный вклад в теорию электромагнитных систем электрических аппаратов, а также на опыт исследований и расчетов, накопленный специалистами ведущих отечественных предприятий электроаппаратостроения.

Цель работы и задачи исследований.

1. Разработка эффективных систем форсированного управления, пригодных для использования в электрических аппаратах с целью повы-

шения их экономичности и конкурентоспособности на мировом рынке.

2. Разработка эффективных обобщенных методов проектирования форсированных электромагнитных систем, включающих в себя методы расчета их основных параметров и характеристик, в том числе:

- магнитных проводимостей воздушных зазоров электромагнитов;
- насыщенных магнитных цепей с распределенными параметрами, а также потокосцеплений обмоток форсированных электромагнитов с учетом нелинейных свойств их магнитопроводов;
- нагрева обмоток форсированных электромагнитных систем с учетом влияния пульсаций токов и магнитных потоков;
- динамических характеристик форсированных электромагнитных систем с учетом влияния вторичных контуров (в том числе контуров вихревых токов в магнитопроводах) и систем управления;
- коммутационных перенапряжений на обмотках и других элементах (в частности, на искрогасительных конденсаторах) форсированных электромагнитных систем.

3. Разработка эффективных алгоритмов, позволяющих реализовать указанные методы на современных ЭВМ.

#### Методы исследований.

В диссертационной работе использовался математический аппарат, позволяющий разрабатывать эффективные алгоритмы расчета и проектирования форсированных электромагнитных систем, в частности методы вариационного исчисления, метод Монте-Карло, метод сеток для расчета потенциальных полей, методы планирования ортогональных экспериментов и пр. Разработанные в диссертации методы расчета и проектирования форсированных электромагнитных систем иллюстрируются схемами алгоритмов, на основе которых могут быть созданы соответствующие машинные программы.

#### Основные положения, выносимые на защиту.

1. Обобщенные методы анализа и проектирования форсированных электромагнитных систем с учетом взаимосвязей определяющих тепловых и электромагнитных процессов в статическом и динамическом режимах, в том числе:

1.1. Новые методы расчета магнитных проводимостей воздушных зазоров с использованием вариационных и численных методов, а также метода Монте-Карло.

1.2. Методы анализа добавочных потерь в обмотках и магнитопроводах, обусловленных пульсациями магнитного потока при питании обмоток от источников выпрямленного или пульсирующего напряжения.

1.3. Методы оценки коммутационных перенапряжений, возникающих

в обмотках, при включении и отключении форсированных электромагнитных систем с пусковыми и удерживающими обмотками.

2. Результаты практической реализации разработанных обобщенных методов проектирования форсированных электромагнитных систем, в том числе:

2.1. Новые системы форсированного управления, защищенные авторскими свидетельствами.

2.2. Алгоритмы расчета статических и динамических характеристик, а также нагрева обмоток электромагнитных систем электрических аппаратов, в том числе, работающих в форсированном режиме.

2.3. Алгоритмы проектирования форсированных электромагнитных систем по условиям их работы в статическом и динамическом режимах.

#### Научная новизна.

1. Классификация систем форсированного управления по способу изменения МДС в процессе срабатывания электромагнита.

2. Обобщенные методы анализа и проектирования форсированных электромагнитных систем с учетом взаимосвязей определяющих тепловых и электромагнитных процессов в статическом и динамическом режимах.

3. Новые методы расчета магнитных проводимостей воздушных зазоров с использованием вариационных и численных методов, а также метода Монте-Карло.

4. Методы анализа добавочных потерь в обмотках и магнитопроводах, обусловленных пульсациями магнитного потока при питании обмоток от источников выпрямленного или пульсирующего напряжения.

#### Практическая ценность.

1. Новые системы форсированного управления, защищенные авторскими свидетельствами.

2. Алгоритмы расчета статических и динамических характеристик, а также нагрева обмоток электромагнитных систем электрических аппаратов, в том числе, работающих в форсированном режиме.

3. Методы оценки коммутационных перенапряжений, возникающих в обмотках, при включении и отключении форсированных электромагнитных систем с пусковыми и удерживающими обмотками.

4. Алгоритмы проектирования форсированных электромагнитных систем по условиям их работы в статическом и динамическом режимах.

#### Реализация выводов и рекомендаций работы.

Рекомендации по расчету и проектированию форсированных электромагнитных систем, приведенные в данной работе, использовались при разработке новых серий аппаратов в НПО ХЭМЗ, АО ЭНАС (бывш. ВНИИ-Электроаппарат), ИГМАШ АН Украины, НПО ФЭД и др.

При участии автора данной работы разрабатывались форсированные электромагнитные системы контакторов КП7 и КП207 (НПО ХЭМЗ), КМ24 и КМ25 (АО ЭНАС), форсунок для двигателей внутреннего сгорания (ИПМАШ), устройств управления гидропривода рулей самолетов (НПО ФЭД).

Системы форсированного управления, разработанные автором диссертации, установлены и эксплуатируются на ряде крупных предприятий Украины и стран СНГ (НПО ХЭМЗ, Старооскольский металлургический комбинат, Объединение Автоваз, завод "Запорожсталь", ряд предприятий транспорта и др.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации и отдельные разделы докладывались и обсуждались на II Республиканской межвузовской конференции по электротехнике, Запорожье, 1969 г.; I Всесоюзной конференции по искусственному сердцу, Москва, ВНИИЭМ, 1978 г.; IV Всесоюзной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития НВА", Гомель, 1981 г.; V Всесоюзной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития НВА", Ульяновск, 1985 г.

Наиболее полно отдельные разделы диссертации докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях Харьковского политехнического института в 1967 - 1993 гг.

**Публикации.** В диссертации приведены ссылки на 25 публикаций автора, в том числе на две монографии и 16 авторских свидетельств на изобретения, в которых отражено основное содержание диссертации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Содержание работы изложено на 197 страницах машинописного текста, иллюстрировано 86 рисунками, имеет перечень литературы, включающий 150 наименований.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, отмечена перспективность разработки электрических аппаратов с форсированными электромагнитными системами.

**В первой главе** приведен обзор литературы по системам форсированного управления. Предложено форсированную электромагнитную систему (ФЭМС) рассматривать в виде структуры, изображенной на рис. 1.

Классификация систем форсированного управления (СФУ) строится, исходя из способа изменения МДС обмотки (системы обмоток) форсированного электромагнита в процессе его срабатывания. Подробно анализируется большое количество СФУ, входящих в следующие классификационные группы: СФУ с балластными элементами; СФУ с пусковыми обмот-

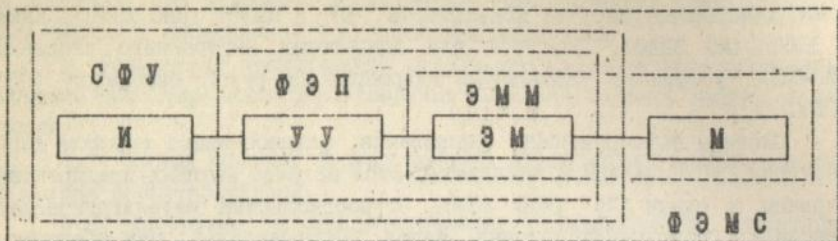


Рис. 1. Структура форсированной электромагнитной системы (ФЭМС)

И - источник питания; УУ - устройство управления;  
 ЭМ - электромагнит; М - механизм; СФУ - система форсированного  
 управления; ФЭП - форсированный электромагнитный привод;  
 ЭММ - электромагнитный механизм.

ками; СФУ с переключением обмоток с параллельного соединения на последовательное; СФУ с переключением источника питания; СФУ с изменением схемы выпрямления; СФУ с реактивными накопителями энергии; СФУ с транзисторными прерывателями; СФУ для электромагнитов импульсного действия и с залипанием. На основе анализа достоинств и недостатков существующих СФУ автором предложен ряд новых систем, защищенных авторскими свидетельствами [10 - 25].

В этой же главе дается обзор методов расчета форсированных электромагнитных систем (методы расчета нагрева обмоток, расчета магнитных полей и динамических характеристик). На основании данных обзора сформулированы выводы и поставлены задачи исследования.

Во второй главе изложены разработанные автором новые методы расчета магнитных проводимостей воздушных зазоров с использованием вариационных и численных методов, а также метода Монте-Карло.

Вариационные методы могут быть с успехом применены к расчету магнитных проводимостей плоских и плоскомеридианных геометрических областей. Возможность применения вариационных методов вытекает из того, что указанная задача, наряду с дифференциальными уравнениями, описывается так называемым минимальным (экстремальным) принципом, из которого следует, что потенциальная функция устанавливается таким образом, что энергия поля принимает минимальное значение. Ввиду этого проблема решения граничной задачи оказывается эквивалентной проблеме нахождения функции, которая сообщает минимум интегралу энергии. Для линейных неферромагнитных сред выражение для энергии  $W$  можно записать в следующем виде:

$$W = \frac{\mu_0}{2} \cdot \int_V (\text{grad } \varphi)^2 \cdot dV, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная,  $\varphi$  - скалярный магнитный потенциал.

Если энергия поля известна, то вычислить проводимость можно с помощью известного выражения:

$$W = \Lambda \cdot F^2 / 2, \quad (2)$$

где  $F$  - разность магнитных потенциалов полюсов.

Поэтому расчет проводимости сводится к отысканию функции  $\varphi$ , которая сообщает минимум интегралу (1). Эта задача может быть решена прямыми методами вариационного исчисления (Ритца, Галеркина, Канторовича). Применение вариационных методов существенно расширяет круг задач, решение которых может быть получено аналитически. В диссертации приведено решение задачи расчета магнитных проводимостей между коническими и усеченно-коническими торцами цилиндрических полюсов. Полученные расчетные формулы достаточно просты и могут быть использованы в инженерной практике.

Метод статистических испытаний (Монте-Карло) принципиально позволяет производить вычисления проводимостей при произвольной форме опорных поверхностей полюсов. В основу разработанного в диссертации метода положен статистический метод решения задачи Дирихле для уравнения Лапласа (метод блуждания по сферам). Согласно этому методу скалярный потенциал произвольной точки поля определяется как математическое ожидание потенциалов на финишах траекторий случайного блуждания по сферам. Траектория блуждания начинается (стартует) в точке, потенциал которой требуется определить, радиус сферы может быть принят равным расстоянию от точки до границы области, движение из центра сферы на ее поверхность осуществляется в случайном направлении. Каждая точка на поверхности сферы рассматривается как центр новой сферы  $P_1$  (узловая точка), из которой в случайном направлении делается новый шаг на поверхность новой сферы и т.д. Блуждание считается законченным, когда узловая точка траектории подойдет достаточно близко (на расстояние, менее некоторого малого положительного числа  $\epsilon$ ) к границе области, т.е. к одному из полюсов.

Метод блуждания по сферам может служить основой для определения проводимостей. В диссертации показано, что магнитная проводимость пропорциональна среднему значению потенциалов на финишах (вблизи полюсов или в удаленных точках) траекторий случайных блужданий, старты которых приходятся на точки  $P_{oi}$ , отстоящие на расстоянии  $\Delta$  от случайных точек  $P_1$ , равномерно распределенных на поверхности  $S$ , ограничивающей полюс с потенциалом  $\varphi = 0$ :

$$\Lambda \approx \frac{\mu_0 \cdot S}{\Delta} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N \varphi_k \quad (3)$$

где,  $N$  - количество случайных блужданий;  $\varphi_k$  - потенциал на финише  $k$ -й траектории.

Алгоритм блуждания по сферам, реализованный в виде программы для ЭВМ, был применен к расчету удельной геометрической проводимости рассеивания между цилиндром и прямоугольным параллелепипедом, а также между цилиндром и двумя прямоугольными параллелепипедами. Результаты расчетов были обработаны с помощью метода наименьших квадратов. В результате обработки были получены следующие формулы:

$$\lambda_1 = (3.17 + 0.22 \cdot n - 0.56 \cdot \beta^{-1} - 0.50 \cdot n \cdot \beta^{-1}) / \sqrt{n} \quad (4)$$

$$\lambda_2 = (4.54 - 1.25 \cdot n + 0.20 \cdot \beta - 0.10 \cdot n \cdot \beta) / \sqrt{n} \quad (5)$$

где  $n$  - отношение кратчайшего расстояния между полюсами к диаметру круглого полюса;  $\beta$  - отношение высоты поперечного сечения прямоугольного полюса к диаметру круглого полюса.

Результаты расчетов по формуле (4) практически совпадают с данными, полученными путем моделирования поля в электролитической ванне. Таким образом, метод Монте-Карло позволяет производить расчет проводимостей с удовлетворительной точностью при относительно сложных конфигурациях полюсов.

**Численные методы.** При сложной конфигурации полюсов расчет проводимостей может быть выполнен с использованием численных методов, в частности метода сеток. В соответствии с этим методом область поля  $D$  покрывается сеткой, имеющей ячейки той или иной формы. Чаще всего применяется сетка с ячейками квадратной формы (квадратная сетка). Производные в уравнении Лапласа замещаются для каждой внутренней точки дискретной области  $D^*$  разностными отношениями, в результате чего решение уравнения Лапласа сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений, причем количество уравнений и, следовательно, неизвестных величин равно количеству внутренних точек области  $D^*$ . Для решения таких систем уравнений используют итерационные методы, из которых предпочтение обычно отдают итерационному процессу Лисмана-Зейделя. После завершения расчета поля приступают к вычислению проводимостей. При этом обычно используют закон Ома для участка магнитной цепи, а магнитный поток  $\Phi$  определяют из выражения:

$$\Phi = \mu_0 \cdot \int \text{grad}_n \varphi \cdot dS \quad (6)$$

где  $\text{grad}_n \varphi$  - проекция градиента потенциала на внешнюю нормаль к элементу поверхности полюса  $dS$ .

Если граница области  $D$  не совпадает с узлами сетки, то при вычислении градиента потенциала возникают большие погрешности. Кроме того, определенные сложности возникают при вычислении поверхностного интеграла (6).

В диссертации предложено определять магнитную проводимость из выражения для магнитной энергии  $W_m$  области поля:

$$\Lambda = 2 \cdot W_m / F^2 = 2 \cdot W_m \Big|_{F=1} \quad (7)$$

где  $F$  - разность магнитных потенциалов полюсов.

Для плоскопараллельного поля

$$W_m = \frac{\mu_0 \cdot l}{2} \cdot \iint_D \left[ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial Y} \right)^2 \right] \cdot dX \cdot dY, \quad (8)$$

где  $X, Y$  - координаты точки в плоском сечении;  $l$  - размер области поля в направлении, перпендикулярном плоскости  $(X, Y)$ .

Интегрирование в (8) можно заменить суммированием по ячейкам сетки в области  $D^*$ , которая состоит либо из квадратных ячеек, либо из ячеек в форме равнобедренного прямоугольного треугольника, причем последние могут располагаться только вблизи границы.

Для вычисления интеграла (8) в пределах квадратной ячейки сетки будем аппроксимировать функцию  $\varphi(X, Y)$  выражением вида:

$$\varphi = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y + a_3 \cdot X \cdot Y, \quad (9)$$

где  $a_1 \dots a_3$  - эмпирические коэффициенты, определяемые при помощи метода наименьших квадратов.

Если сместить начало координат в центр ячейки и ввести замену:

$$x_1 = \frac{X - X_{i0}}{h}; \quad x_2 = \frac{Y - Y_{j0}}{h}, \quad (10)$$

то минимальные и максимальные значения абсолютных координат  $X$  и  $Y$  в пределах ячейки обратятся соответственно в  $-1$  и  $+1$  для относительных координат  $x_1$  и  $x_2$ , а выражение (9) примет следующий вид:

$$\varphi = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (11)$$

Для определения коэффициентов  $b_0, b_1, b_2$  и  $b_3$  можно воспользоваться формулами, известными из теории ортогонального планирования. Составив матрицу  $KT32^2$ , получаем:

$$b_1 = (-\varphi_{1,j} + \varphi_{i+1,j} - \varphi_{1,j+1} + \varphi_{i+1,j+1}) / 4; \quad (12)$$

$$b_2 = (-\varphi_{1,j} - \varphi_{i+1,j} + \varphi_{1,j+1} + \varphi_{i+1,j+1}) / 4; \quad (13)$$

$$b_3 = (\varphi_{1,j} - \varphi_{i+1,j} - \varphi_{1,j+1} + \varphi_{i+1,j+1}) / 4. \quad (14)$$

С учетом (7-14) выражение для определения составляющей удельной геометрической проводимости  $g = \Lambda / (\mu_0 \cdot l)$  квадратной ячейки приобретает следующий вид:

$$g_{\square} = 4 \cdot (b_1^2 + b_2^2 + 2 \cdot b_3^2 / 3); \quad (15)$$

Выражение для определения составляющей удельной геометрической проводимости треугольной ячейки, примыкающей к границе, имеет следующий вид:

$$g_{\Delta} = 4 \cdot b^2 = (\varphi_r - \varphi_0)^2 / 4, \quad (16)$$

где  $\varphi_r$  - потенциал точки треугольной ячейки, принадлежащей границе;  $\varphi_0$  - потенциал точки, не принадлежащей границе.

Важным достоинством описанного метода является то, что, в силу энергетического подхода, при его использовании не требуется очень мелких сеток и, следовательно, искомый результат получается при относительно небольших объемах вычислений.

В третьей главе описаны разработанные автором алгоритмы расчета статических и динамических характеристик электромагнитных систем электрических аппаратов, в том числе, работающих в форсированном режиме.

Алгоритм расчета статических тяговых характеристик и характеристик потокоцепления основан на представлении электромагнитной системы в виде нелинейной магнитной цепи с распределенными параметрами. Такой подход, как показывает практика расчетов, дает хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными для электромагнитов клапанного и броневоего типа и, в то же время, не требует очень больших объемов вычислений. В диссертации описаны приемы, способствующие ускорению расчетов по указанному алгоритму. В частности, предложен способ аппроксимации кривых намагничивания с помощью функций вида:

$$H = a \cdot B^n \cdot K(B), \quad (17)$$

где  $a, n$  - эмпирические коэффициент и показатель;  $K(B)$  - корректирующая функция вида:

$$K = \prod_{i=1}^m (1 + a_{1i} \cdot \exp(a_{2i} \cdot (a_{3i} - B))), \quad (18)$$

$a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}$  - эмпирические коэффициенты.

В диссертации приведены аппроксимирующие выражения кривых намагничивания наиболее распространенных марок стали, используемых при изготовлении электромагнитов: горячекатаной низкоуглеродистой марки 10895 (Армко), литевой марок Л20-Л25 и холоднокатаной листовой марки 3413 (З330). Предложены также алгоритмы, с помощью кото-

рых по таблично заданной зависимости  $\Phi_{\psi}(\delta, F)$  при помощи сплайнов второго порядка строятся зависимости  $\Phi'_{\psi}(\delta, F)$  и  $Q(\delta, F)$ , а также описывается алгоритм определения МДС  $F$  по заданным значениям  $\delta$  и  $\Phi_{\psi}$  из зависимости  $\Phi_{\psi}(\delta, F)$ . Указанный алгоритм находит применение при расчете динамики электромагнитов.

Особенности расчета динамики форсированных электромагнитов состоят в том, что, во-первых, ввиду более быстрого срабатывания, существенным является влияние вихревых токов в магнитопроводах, во-вторых, на процессы динамики оказывают влияние вторичные контура в многообмоточных СВУ и, в-третьих, процессы динамики определяются работой устройств управления, содержащих ключевые элементы (контактные и бесконтактные). Если учет влияния устройства управления может быть решен за счет некоторого усложнения алгоритма, реализующего решение указанных уравнений на ЭВМ, то учет влияния вихревых токов и вторичных контуров сопряжен, в общем случае, с повышением порядка системы дифференциальных уравнений.

Обоснованное в [2] предположение о том, что эквивалентный вторичный контур сцеплен с тем же магнитным потоком, что и намагничивающая обмотка, позволяет учитывать влияние вторичных контуров без повышения порядка системы дифференциальных уравнений динамики ЭМ, а следовательно, без существенных дополнительных затрат машинного времени.

Наиболее высокая эффективность форсировки при минимальных потерях энергии достигается в ЭМ с пусковыми и удерживающими обмотками (рис. 2). В процессе срабатывания такого ЭМ удерживающая обмотка закорачивается (рис. 2,а) или включается параллельно пусковой (рис. 2,б-д). Пусковая обмотка после срабатывания ЭМ включается последовательно с удерживающей (рис. 2,в-д) или отключается (рис. 2,б). В определенные моменты времени, например, когда диод  $V$  на рис. 2,д заперт, обе обмотки в режиме удержания закорочены. Вихревые токи в магнитопроводе также образуют короткозамкнутый контур. Таким образом, СВУ с пусковыми обмотками являются многоконтурными.

На рис. 3. приведены эквивалентные схемы соединения обмоток трехконтурной (пусковая, удерживающая обмотки и короткозамкнутый контур) электромагнитной системы. Эти схемы соответствуют различным стадиям работы схем форсировки, изображенных на рис. 2. Соответствие схем указано в табл. 1.

Система дифференциальных уравнений электрического равновесия в данном случае имеет следующий вид:

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + w_1 \cdot d\Phi_\psi / dt ; \quad (19)$$

$$u_2 = R_2 \cdot i_2 + w_2 \cdot d\Phi_\psi / dt ; \quad (20)$$

$$0 = R_3 \cdot i_3 + w_3 \cdot d\Phi_\psi / dt ; \quad (21)$$

где  $u$ ,  $R$ ,  $i$  - соответственно напряжение, сопротивление и ток; (индекс соответствует номеру контура).

Приведенный магнитный поток  $\Phi_\psi$  в многоконтурной системе зависит от МДС  $F$  системы обмоток, т.е. от суммы:

$$F = i_1 \cdot w_1 + i_2 \cdot w_2 + i_3 \cdot w_3 . \quad (22)$$

Из (19) - (21) можно получить выражения, связывающие токи обмоток с МДС  $F$ :

$$i_1 = (F/w_1 + u_1 \cdot (1/R'_2 + 1/R'_3) - u_2 \cdot w_1 / (R'_2 \cdot w_2)) / (1 + R_1/R'_2 + R_1/R'_3) ; \quad (23)$$

$$i_2 = (u_2 - w_2 \cdot (u_1 - R_1 \cdot i_1) / w_1) / R_2 ; \quad (24)$$

$$i_3 = w_3 \cdot (-u_1 - R_1 \cdot i_1) / (R_3 \cdot w_1) , \quad (25)$$

где  $R'_{2(3)}$  - приведенное к числу витков  $w_1$  сопротивление обмотки второго (третьего) контура:

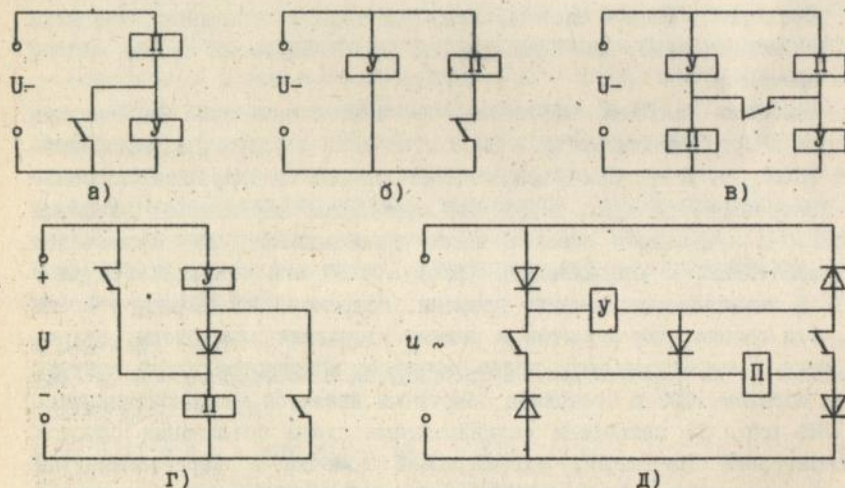


Рис. 2. Некоторые схему СВУ с пусковыми и удерживающими обмотками:

а - с последовательным включением пусковой и удерживающей обмоток;

б - с параллельным включением пусковой и удерживающей обмоток;

в - с включением обмоток по схеме неуравновешенного моста;

г - с переключением обмоток с параллельного на последовательное соединение;

д - с переключением обмоток с параллельного на последовательное соединение с одновременным изменением схемы выпрямления.

$$R'_2(3) = R_2(3) \cdot w_1^2 / w_2^2(3) \quad (26)$$

Обозначим через "п", "у", "к" индексы, относящиеся соответственно к пусковой, удерживающей и короткозамкнутой обмоткам. Тогда  $R_3 = R_k$ ,  $w_3 = w_k$ , а значения  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $w_1$  и  $w_2$  следует выбирать в зависимости от вида схемы форсировки и режима ее работы в соответствии с табл. 1.

Таким образом, интегрирование системы дифференциальных уравнений (19)-(21) можно заменить интегрированием одного из уравнений,

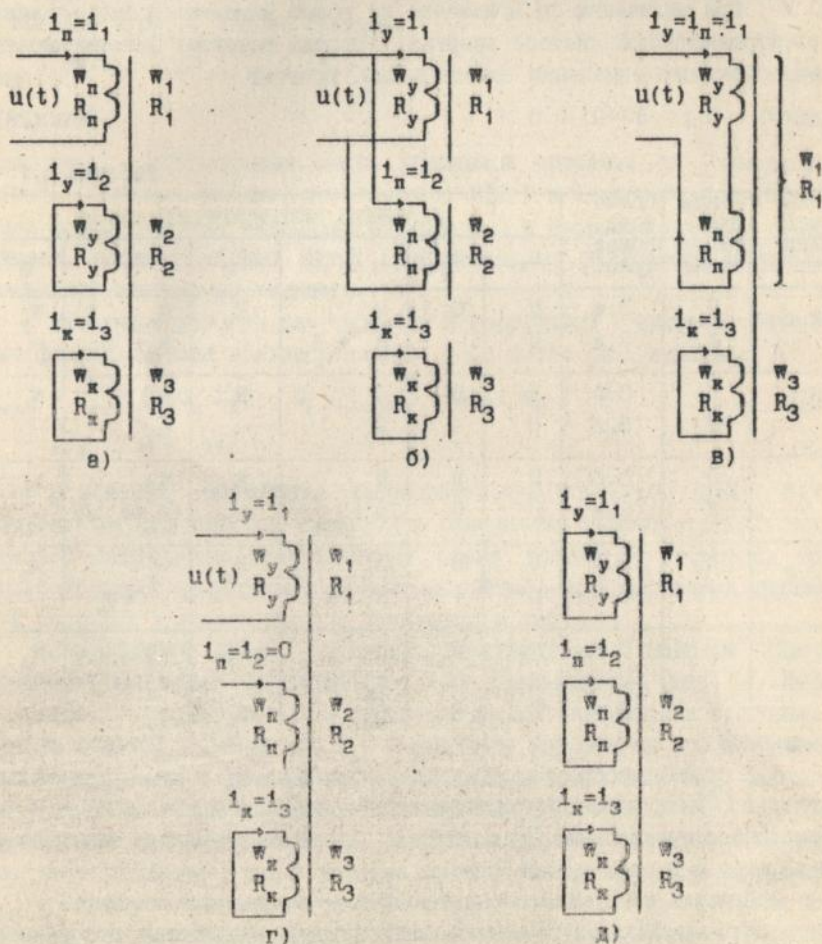


Рис. 3. Эквивалентные схемы соединения обмоток.

например уравнения (19). Интегрирование этого уравнения следует выполнять одним из численных методов. Если для этой цели применить метод Эйлера, то расчетная формула, полученная из уравнения (19), имеет следующий вид:

$$(\Phi_{\psi})_{k+1} = (\Phi_{\psi})_k + (u_1(t_k) - R_1 \cdot i_1(t_k)) \cdot \Delta t / w_1, \quad (27)$$

где  $t_k$  - момент, соответствующий  $k$ -му узлу дискретизации времени;  $(\Phi_{\psi})_k, (\Phi_{\psi})_{k+1}$  - значения потока  $\Phi_{\psi}$  в моменты времени  $t_k$  и  $t_{k+1}$ ;  $\Delta t$  - шаг дискретизации оси времени.

Начальное условие формулируется относительно потока  $\Phi_{\psi}$  или МДС  $F$ . При включении ЭМ мгновенно не может измениться накопленная в электромагнитной системе энергия. Отсюда вытекает невозможность скачкообразного изменения потока и МДС, поэтому

$$\Phi_{\psi}(+0) = 0; \quad F(+0) = 0. \quad (28)$$

Таблица 3.1

Схема форсировки (рис.)	Режим работы схемы	Схема соедин. обмот (рис.)	Параметры эквивалентной схемы					
			$u_1$	$u_2$	$R_1$	$R_2$	$w_1$	$w_2$
2,а	П	3,а	U	0	$R_n$	$R_y$	$w_n$	$w_y$
	У	3,в	U	-	$R_n + R_y$	-	$w_n + w_y$	-
2,б	П	3,б	U	U	$R_y$	$R_{II}$	$w_y$	$w_n$
	У	3,г	U	-	$R_y$	-	$w_y$	-
2,в	П	3,б	U	U	$R_y$	$R_n$	$w_y$	$w_n$
	У	3,в	U	U	$(R_y + R_n)/4$	-	$(w_y + w_n)/2$	-
2,г	П	3,б	U	U	$R_y$	$R_n$	$w_y$	$w_n$
	У	3,в	U	-	$R_n + R_y$	-	$w_n + w_y$	-
2,д	П	3,б	$u_{11}$	$u_{11}$	$R_y$	$R_n$	$w_y$	$w_n$
	У	3,в	$u_1$	-	$R_n + R_y$	-	$w_n + w_y$	-
	У	3,д	0	0	$R_y$	$R_n$	$w_y$	$w_n$

#### Примечание

1. В схеме, изображенной на рис. 2,в,  $w_y$  и  $w_n$  - суммарные числа витков соответственно удерживающих и пусковых обмоток, а  $R_y$  и  $R_n$  - суммарные сопротивления этих обмоток; в режиме удержания ток каждой из обмоток в 2 раза меньше тока  $i_1$ .

2. Приняты следующие обозначения: U - напряжение источника;  $u_1, u_{11}$  - одно- и двухполупериодное выпрямленное напряжение источника; П - пусковой режим; У - режим удержания.

Начальные значения токов определяют через начальное значение МДС при помощи (23) - (25). Из этих выражений следует, что токи в обмотках в момент коммутации при  $u \neq 0$  изменяются скачкообразно, при этом токи в обмотках имеют противоположные направления, а их значения таковы, что суммарная МДС в момент коммутации остается равной нулю.

В период трогания, когда подвижная система ЭМ покоится, динамика описывается только уравнениями, характеризующими электромагнитные процессы. После начала движения система уравнений дополняется уравнениями, описывающими процесс движения, составленными на основании второго закона Ньютона:

$$m_{\text{пр}} \cdot dv/dt = Q(\delta, F) - Q_c(\delta, v); \quad (29)$$

$$v = dx/dt, \quad (30)$$

где  $m_{\text{пр}}$  - приведенная масса подвижной системы;  $v$  - скорость;  $Q(\delta, F)$  - тяговое усилие, зависящее от МДС  $F$  и зазора  $\delta$ ;  $Q_c(\delta, v)$  - сила сопротивления, зависящая от зазора  $\delta$  и скорости  $v$ ;  $x$  - координата, соответствующая пути, пройденному от начального положения подвижной системы до текущего.

Начальные условия для скорости и координаты - нулевые. Расчетные формулы метода Эйлера для (29), (30) имеют следующий вид:

$$v_{k+1} = v_k + (Q(\delta_k, F_k) - Q_c(\delta_k, v_k)) \cdot \Delta t / m_{\text{пр}}; \quad (31)$$

$$x_{k+1} = x_k + v_k \cdot \Delta t. \quad (32)$$

В моменты коммутации вспомогательных контактов ( $x=x_p$ ;  $x_p$  - координата, при которой происходит размыкание вспомогательных контактов) изменяется эквивалентная схема соединения обмоток. Это обстоятельство должно быть учтено алгоритмом интегрирования уравнений динамики с учетом данных, указанных в табл. 1.

Угруппированная схема алгоритма интегрирования методом Эйлера уравнений динамики форсированного ЭМ приведена на рис. 4. Блок операторов 1 организует ввод исходных данных (напряжение источника, данные обмоток, полный ход  $x_0$ , координата размыкания вспомогательных контактов  $x_p$ , приведенная масса подвижной системы  $m_{\text{пр}}$ , координаты узловых точек характеристики противодействующих сил, массивы приведенных по потокоцеплению магнитных потоков и тяговых усилий, шаг интегрирования  $\Delta t$  и верхняя граница интервала интегрирования  $t_p$ ) и задает начальные условия:  $\Phi_\psi(0)=0$ ;  $x(0)=0$ ;  $v(0)=0$ . Поскольку шаг интегрирования должен быть достаточно малым, то вывод

результатов следует осуществлять не на каждом шаге, а через  $p$  шагов (величина  $p$  также входит в состав исходных данных).

Оператор 2 обеспечивает обнуление счетчика числа шагов  $J_p$ , необходимого для организации вывода на каждом  $p$ -м шаге.

Блок операторов 3 реализует вычисление МДС  $F$  системы обмоток, тягового усилия  $Q$  по найденному значению МДС  $F$  и ходу  $x$ , противодействующего усилия  $Q_c$ , а также токов  $i_1 - i_3$  по (23) - (25) и напряжений  $U_1$  и  $U_2$  с учетом данных, приведенных в табл. 1. На рис. 5 приведен в качестве примера алгоритм вычисления напряжений и токов в схеме, изображенной на рис. 2,б (параллельное включение пусковой и удерживающей обмоток).

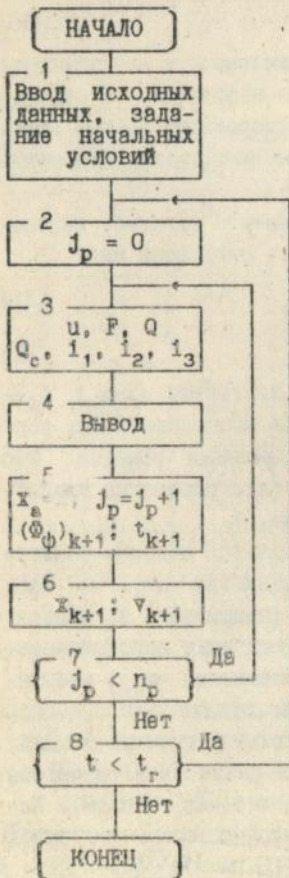


Рис. 4. Укрупненная схема алгоритма расчета динамики форсированного электромагнита.

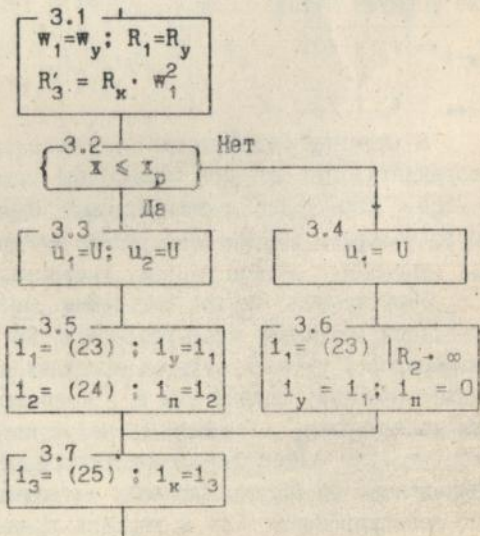


Рис. 5. Алгоритм вычисления токов в схеме с параллельным включением пусковой и удерживающей обмоток.

Блок операторов 4 организует вывод результатов счета на каждом  $p$ -м шаге, начиная с начальных условий, а также в моменты, соответствующие размыканию вспомогательных контактов и приходу подвижной системы на упор. Для фиксации этих моментов введена вспомогательная переменная  $x_a$ , значение которой равно координате  $x$  на предыдущем шаге. Схема алгоритма вывода результатов дана на рис. 6.

Блок операторов 5 обеспечивает присваивание вспомогательной переменной  $x_a$  значения координаты  $x$ , увеличение на единицу значения переменной  $J_p$ , вычисление приведенного магнитного потока на следующем шаге по (27) и увеличение времени на величину  $\Delta t$ .

Блок операторов 6 реализует вычисление значений координаты  $x$  и скорости  $v$  на следующем шаге по (31) и (32). Схема соответствующего алгоритма приведена на рис. 7. Данный алгоритм ограничивает

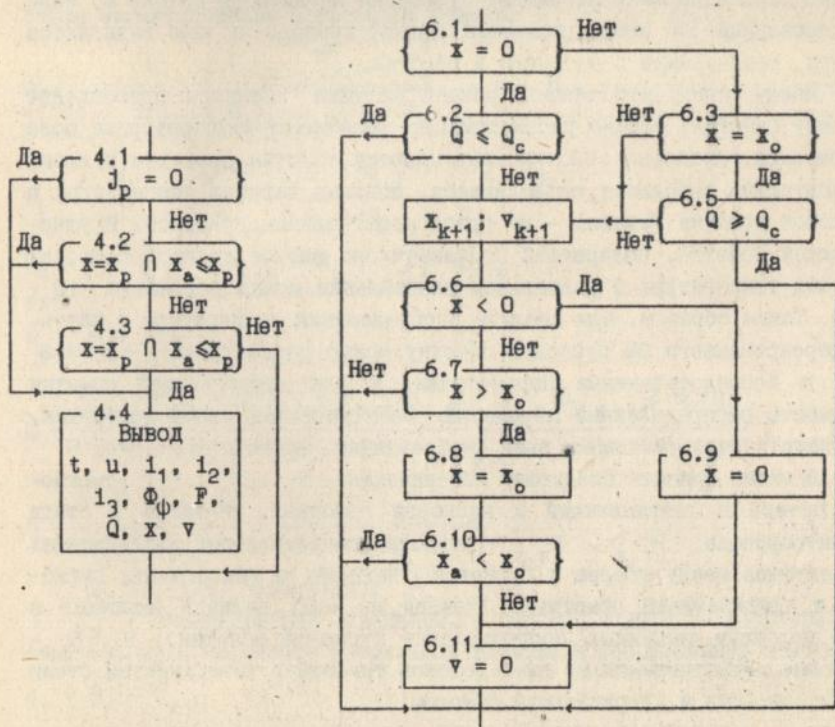


Рис. 6. Алгоритм вывода результатов расчета динамики.

Рис. 7. Алгоритм вычисления координаты  $x$  и скорости  $v$  при расчете динамики.

изменение координаты  $x$  интервалом  $[0; x_0]$ , зануляя скорость на концах этого интервала.

Нагрев обмоток форсированных ЭМ имеет целый ряд особенностей. Во-первых, на нагрев обмоток существенно влияют пусковые токи, поэтому форсированный ЭМ, работающий в повторно-кратковременном режиме с большой частотой срабатываний, может нагреваться сильнее, чем тот же ЭМ, работающий в продолжительном режиме. Во-вторых, широко распространены системы с пусковыми и удерживающими обмотками. Эти обмотки имеют различные теплопроводности и плотности источников тепла, а потому по-разному нагреваются. В-третьих, существуют различные СФУ, в которых в режиме удержания к обмотке прикладывается пульсирующее напряжение, при этом значительные пульсации тока приводят к увеличению его действующего значения по отношению к среднему значению и, следовательно, к увеличению потерь в обмотке. В этом случае пульсации тока порождают пульсации магнитного потока и, если форсированный ЭМ имеет сплошной магнитопровод, в нем выделяются потери, соизмеримые с потерями в обмотке.

Ввиду того, что осевой размер катушки намного превосходит толщину намотки, обычно рассматривают одномерное температурное поле в обмотках. Пусковые обмотки наматываются толстым проводом и имеют относительно небольшое число витков, поэтому перепад температуры в пусковой обмотке невелик - не превосходит единиц градусов. В удерживающей обмотке, содержащей большое число витков тонкого провода, перепад температуры в радиальном направлении может достигать  $10 - 20^\circ\text{C}$ . Таким образом, при анализе распределения температуры в катушке форсированного ЭМ пусковую обмотку можно рассматривать как элемент с сосредоточенными параметрами, а для удерживающей обмотки учитывать распределенные параметры. Электрическая схема замещения, соответствующая указанным выше соображениям, приведена на рис. 8.

В схеме приняты следующие обозначения:  $R_y, R_n, R_c$  - мощности потерь в удерживающей и пусковой обмотках, а также в стали магнитопровода;  $R_{c,n}, R_{n,y}$  - тепловые сопротивления изоляционных промежутков между сталью и пусковой обмоткой, а также между пусковой и удерживающей обмотками (каждая из этих величин включает в себя половину теплового сопротивления пусковой обмотки);  $R_c, R_y$  - тепловые сопротивления на пути потоков теплоты с поверхностей стали магнитопровода и удерживающей обмотки.

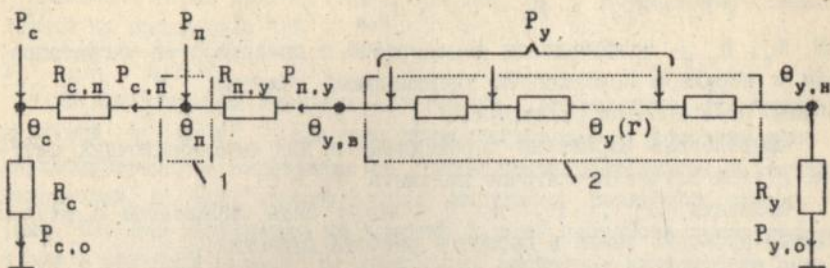


Рис. 8. Схема замещения для расчета нагрева пусковой (1) и удерживающей (2) обмоток.

Для данной модели в диссертации получены выражения, позволяющие рассчитывать среднеинтегральное значение превышения температуры удерживающей обмотки; а также превышения температуры стали магнитопровода и пусковой обмотки :

$$\theta_{y, \text{ср}} = \frac{q_y}{2} \cdot \left[ \frac{r_{y, \text{н}}}{h_{y, \text{н}}} + \frac{r_{y, \text{н}}^2 - r_{y, \text{в}}^2}{4 \cdot \lambda_y} + C \cdot D \right]; \quad (33)$$

$$\theta_c = \frac{\theta_{y, \text{в}} + P_c \cdot (R_{c, \text{п}} + R_{n, \text{у}}) + P_n \cdot R_{n, \text{у}}}{1 + R_{c, \text{п}} / R_c + R_{n, \text{у}} / R_c}; \quad (34)$$

$$\theta_n = \theta_c \cdot (1 + R_{c, \text{п}} / R_c) - P_c \cdot R_{c, \text{п}}. \quad (35)$$

где

$$\theta_{y, \text{в}} = \theta_y(r) \Big|_{r = r_{y, \text{в}}}; \quad (36)$$

$$C = \frac{(r_{y, \text{н}}^2 - r_{y, \text{в}}^2) / (2 \cdot \lambda_y) + r_{y, \text{н}} / h_{y, \text{н}} + r_{y, \text{в}} / h_{y, \text{в}} - 2 \cdot \theta_c^* / q_y}{\ln(r_{y, \text{н}} / r_{y, \text{в}}) + \lambda_y \cdot (1 / (h_{y, \text{н}} \cdot r_{y, \text{н}}) + 1 / (h_{y, \text{н}} \cdot r_{y, \text{н}}))}; \quad (37)$$

$$D = \frac{\ln(r_{y, \text{н}} / r_{y, \text{в}})}{(r_{y, \text{н}} / r_{y, \text{в}})^2} - \frac{1}{2} - \frac{\lambda_y}{h_{y, \text{н}} \cdot r_{y, \text{н}}}. \quad (38)$$

В (33)-(38) обозначено:

$\lambda_y$  - эквивалентный коэффициент теплопроводности удерживающей обмотки;  $q_y$  - плотность источников теплоты в удерживающей обмотке:

$$q_y = P_y / V_y, \quad (39)$$

где  $V_y$  - объем, занимаемый удерживающей обмоткой;  $r_{y, \text{н}}$ ,  $r_{y, \text{в}}$  - радиусы наружной и внутренней поверхностей удерживающей обмотки.

Значения  $R_c$  и  $R_y$  определяются из выражений:

$$R_c = 1 / (h_c \cdot S_{ct}); \quad R_y = 1 / (h_{y,n} \cdot S_{y,n}), \quad (40)$$

где  $h_c, h_{y,n}$  - коэффициенты теплоотдачи с поверхностей магнитопровода и наружной поверхности удерживающей обмотки;  $S_{ct}, S_{y,n}$  - площади поверхностей охлаждения.

Приведенные выражения справедливы и для однообмоточных катушек. В этом случае достаточно положить  $P_n = 0$ .

Мощности  $P_y, P_n$  и  $P_c$  могут быть определены с учетом влияния пусковых токов в процессе расчета динамики:

$$P_{y,n} = \frac{R_{y,n}}{t_{\alpha}} \cdot \int_0^{t_{\alpha}} i_{y,n}^2 dt; \quad P_c = \frac{R_k}{t_{\alpha}} \cdot \int_0^{t_{\alpha}} i_k^2 dt \quad (41)$$

где  $R_y, R_n$  - сопротивления удерживающей и пусковой обмоток;  $t_{\alpha}$  - время цикла в повторно-кратковременном режиме;  $R_k$  - сопротивление эквивалентного короткозамкнутого контура, замещающего сталь магнитопровода в процессе расчета динамики;  $i_y, i_n$  - мгновенные значения токов в удерживающей и пусковой обмотках;  $i_k$  - мгновенное значение тока в эквивалентном короткозамкнутом контуре.

Так как плотность источников  $q_y$  зависит от средней температуры удерживающей обмотки, а коэффициенты теплоотдачи зависят от температур наружной поверхности удерживающей обмотки и стали магнитопровода, то расчет нагрева должен выполняться методом последовательных приближений. Опыт расчетов показывает, что в этом случае хорошие результаты (быструю сходимость) даст метод простых итераций.

Перспективными являются устройства управления, обеспечивающие в период удержания подачу на обмотки форсированных ЭМ пульсирующего или выпрямленного напряжения, что позволяет получить достаточно высокую кратность пускового тока по отношению к току удержания без применения добавочных резисторов, реактивных балластных элементов, пусковых обмоток. Если ЭМ работает в продолжительном режиме, то потери в обмотке  $P_o$  и в стали магнитопровода  $P_c$  могут быть оценены аналитически.

В общем случае мощность потерь  $P$  в ЭМ, работающем в продолжительном режиме, равна :

$$P = P_o + P_c = I^2 \cdot R + P_c, \quad (42)$$

где  $I$  - действующее значение тока в обмотке;  $R$  - активное сопротивление обмотки.

Последнее выражение можно представить в следующем виде:

$$P = U_{cp}^2 / R \cdot (k_{\phi,o}^2 + k_{\phi,c}^2), \quad (43)$$

где  $U_{cp}$  - среднее значение приложенного к обмотке напряжения;  $k_{\phi,o}, k_{\phi,c}$  -

коэффициент формы кривой тока в обмотке;  $k_{\phi,о}$  - коэффициент, определяемый из выражения:

$$k_{\phi,с}^2 = P_c \cdot R / U_{ср}^2 \quad (44)$$

В диссертации получены выражения, позволяющие рассчитывать величины  $k_{\phi,о}^2$  и  $k_{\phi,с}^2$  для трех форм напряжения на обмотке: одно- и двухполупериодное напряжение со срезом части полусинусоиды, а также напряжение в виде прямоугольных импульсов различной скважности (рис. 9). Для напряжения на обмотке в виде импульсов прямоугольной формы с заданной паузой  $\beta$  (рис. 9,в) расчетные зависимости выглядят следующим образом:

$$k_{\phi,о}^2 = \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot \pi - \beta} \cdot \left[ 1 - \frac{\omega \cdot T \cdot (2-a)}{2 \cdot \pi - \beta} \cdot \frac{(1-b) \cdot (1-d)}{1-b \cdot d} \right]; \quad (45)$$

$$b = \exp[(\beta - 2 \cdot \pi) \cdot a / (\omega \cdot T)]; \quad (46)$$

$$d = \exp(-\beta \cdot a / (\omega \cdot T)); \quad (47)$$

$$k_{\phi,с}^2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot T \cdot (1-a)}{(2 \cdot \pi - \beta)^2} \cdot \frac{(1-b) \cdot (1-d)}{1-b \cdot d} \quad (48)$$

где

$$\omega^2 \cdot \Lambda / R = T; \quad R'_x / (R + R'_x) = a; \quad T/a = T_a, \quad (49)$$

$R'_x$  - приведенное сопротивление вторичного короткозамкнутого контура с сопротивлением  $R_x$  и числом витков  $w_x$ :

$$R'_x = R \cdot w^2 / w_x^2, \quad (50)$$

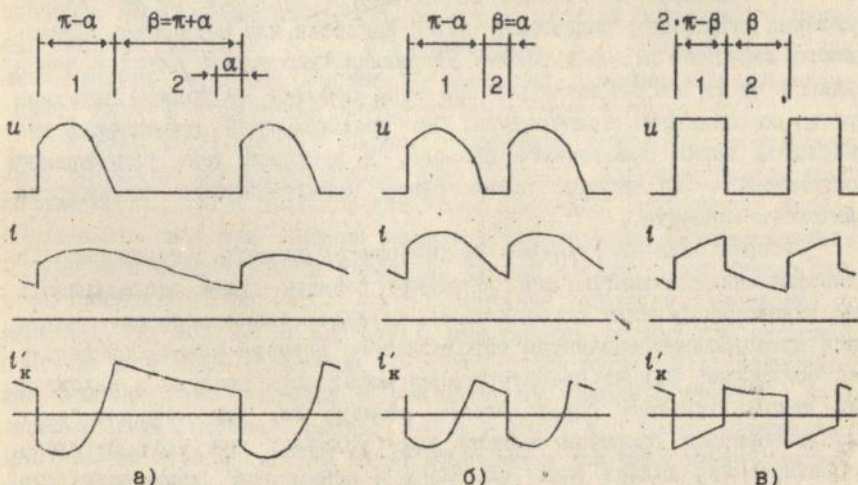


Рис. 9. Временные диаграммы пульсирующих напряжений, токов в намагничивающей обмотке и короткозамкнутом контуре при различных формах напряжения.

Формулы для вычисления  $k_{\phi,о}^2$  и  $k_{\phi,с}^2$  при напряжении на обмотке в виде прямоугольных импульсов намного проще соответствующих зависимостей, полученных для одно- и двухполупериодного выпрямленного напряжения синусоидальной формы со срезом части синусоиды.

В диссертации показано, что с достаточной для практики точностью при расчете  $k_{\phi,о}^2$  и  $k_{\phi,с}^2$  можно производить замену синусоидальных импульсов прямоугольными. При этом угловую ширину  $\gamma$  и амплитуду  $U_n$  прямоугольного импульса определяют таким образом, чтобы сохранить среднее и действующее (среднеквадратичное) значения напряжения.

Таким образом, расчет коэффициентов  $k_{\phi,о}^2$  и  $k_{\phi,с}^2$  можно выполнять вне зависимости от формы напряжения на обмотке и, следовательно, упростить программную реализацию рассмотренной методики учета потерь в обмотках и магнитопроводах.

В четвертой главе описаны разработанные автором методы проектирования форсированных электромагнитных систем по условиям статики и динамики. Основным режимом СВУ является динамический. Однако, если система предназначена для работы в продолжительном режиме, проектирование элементов устройства управления, а также размеров и обмоточных данных ЭМ может быть осуществлено, исходя из условий статики путем анализа двух предельных состояний - пуска и удержания.

Форсированный ЭМ должен обеспечить в пусковом режиме начало движения (трогание) подвижных частей аппарата или механизма, приводимого действием ЭМ, а в режиме удержания притяжение якоря к неподвижной части магнитопровода, при этом обмотки ЭМ должны быть нагреты до заданной температуры, не превосходящей допустимую для выбранной марки обмоточного провода, а пусковой ток, разрываемый контактами, не должен превосходить коммутационную способность ключевого элемента.

Выберем один из размеров ЭМ (например, диаметр  $d$  сердечника) в качестве определяющего. Все остальные размеры будем рассматривать как некоторые функции определяющего размера. Таким образом, задавшись произвольным значением определяющего размера можно определить все остальные. Задача проектирования может быть сведена к нахождению такого значения определяющего размера ЭМ, при котором будут удовлетворяться сформулированные выше условия, при этом методика проектирования должна быть привязана к конкретной схеме включения обмоток ЭМ. В диссертации рассматриваются особенности проектирования нефорсированных электромагнитов и некоторых вариантов СВУ: СВУ

с балластным резистором, СФУ с генератором прямоугольных импульсов, СФУ с переключением соединения обмоток и выпрямителя, СФУ с параллельным включением пусковой и удерживающей обмоток. Все указанные методики проектирования базируются на методах расчета и алгоритмах, описанных во второй и третьей главах диссертации.

При проектировании ЭМ с пусковой и удерживающей обмотками возникает проблема выбора между параллельным и последовательным соединениями этих обмоток. В публикациях по СФУ приводятся различные точки зрения на преимущества той или иной системы, что может быть объяснено различными условиями сопоставления.

В диссертации сопоставлялись СФУ с последовательным (система 1), параллельным (система 2) соединением пусковой и удерживающей обмоток, а также СФУ с включением обмоток по схеме неуравновешенного моста (система 3), исходя из условий неизменности МДС  $F_n$  в пусковом режиме, тока  $I_n$  пусковой обмотки в пусковом режиме и мощности потерь  $P_y$  в режиме удержания. При сопоставлении указанных систем полагалось, что остаются неизменными размеры  $d$  (внутренний диаметр),  $a$  (толщина намотки),  $b$  (высота намотки) катушки, но могут изменяться размеры  $a_n$  и  $a_y$  (толщина намотки пусковой и удерживающей обмоток), однако лишь один из этих размеров, например  $a_n$ , варьируется свободно, так как второй размер дополняет первый до толщины  $a$ . Могут также изменяться и обмоточные данные (число витков и диаметр провода) обмоток, однако здесь имеются лишь два свободно варьируемых параметра, например площади поперечного сечения провода пусковой  $S_{м,п}$  и удерживающей  $S_{м,у}$  обмоток, так как число витков  $w_i$   $i$ -й обмотки при заданных размерах обмотки однозначно связано с площадью поперечного сечения провода  $S_{mi}$ .

В результате решения системы нелинейных уравнений, составленных, исходя из сформулированных выше условий, получены результаты, показывающие, что в реальном диапазоне изменения соотношения размеров обмоток все три системы являются практически эквивалентными. Однако, при сопоставлении указанных систем следует иметь в виду еще и то обстоятельство, что, если размыкание контакта происходит в динамике, то контакт в системе 2 коммутирует только ток пусковой обмотки, а контакт в системе 1 - сумму токов пусковой и удерживающей обмоток, что приводит к увеличенному износу контакта. При использовании системы 3 следует иметь в виду, что провод удерживающей обмотки в этой системе имеет примерно в два раза меньшее поперечное сечение, чем провод удерживающей обмотки в системе 1, а число витков удерживающей обмотки в системе 3 примерно вдвое больше

чем в системе 1. Это объясняется тем, что к удерживающей обмотке системы 3 в режиме удержания прикладывается напряжение, примерно вдвое большее, чем напряжение, прикладываемое к удерживающей обмотке системы 1 в том же режиме.

Проектирование ЭМ по условиям динамики должно осуществляться, когда в технических условиях оговорена возможность работы аппарата в повторно-кратковременном режиме с большой частотой (1200 циклов в час и более). При этом пусковые токи оказывают существенное влияние на нагрев обмотки, в результате чего температура обмотки в повторно-кратковременном режиме может оказаться выше, чем температура в продолжительном режиме.

Так как ЭМ, предназначенный для работы в повторно-кратковременном режиме, должен быть работоспособным и в продолжительном режиме, то проектирование по условиям динамики должно предшествовать проектированию по условиям статики, в результате чего находят минимальное значение определяющего размера  $d_{\min}$ , при котором гарантируется срабатывание и удержание.

Затем для ряда ЭМ с определяющими размерами  $d > d_{\min}$  производится расчет динамики, в результате которого определяют средние мощности потерь в пусковой и удерживающей обмотках  $P_n$ ,  $P_y$ , а также в стали  $P_{ст}$ . Далее для каждого значения  $d$  производят расчет нагрева обмоток, строят зависимости  $\theta_n(d)$  и  $\theta_y(d)$ , по которым находят значение определяющего размера  $d$ , удовлетворяющего условиям динамики. Если при  $d \geq d_{\min}$  ординаты функций  $\theta_n(d)$  и  $\theta_y(d)$  лежат ниже горизонтали  $\theta = \theta_{\text{доп}}$ , то это значит, что более напряженным в тепловом отношении оказывается продолжительный режим и определяющий размер принимают равным  $d_{\min}$ . Расчеты, связанные с проектированием форсированных ЭМ по условиям динамики должны иметь итеративный характер. Это объясняется тем, что на динамические характеристики оказывает существенное влияние нагрев обмоток (через их сопротивление), а на нагрев обмоток влияет вид динамических характеристик (через мощности  $P_n$ ,  $P_y$  и  $P_c$ ). Схема итераций при проектировании по условиям динамики проведена на рис. 10. В эту схему в качестве операторов входят описанные выше алгоритмы расчета динамики и нагрева, реализованные в виде программ DYNAM и TEMPRE.

Вспомогательные контакты в ОФУ с целью уменьшения их износа обычно шунтируют конденсатором, емкость которого следует подбирать так, чтобы максимальное значение напряжения на нем не превосходило допустимого значения в пусковом режиме и при отключении.

Предположение о полной магнитной связи обмоток является весьма

эффективным приемом, позволяющим рассчитывать динамику ЭМ при наличии вторичных контуров, не повышая порядок системы дифференциальных уравнений. Это допущение практически не влияет на переходные токи в обмотках и, следовательно, на временные параметры динамики - время трогания, время движения и т.п. В то же время указанное допущение приводит в ряде случаев к занижению расчетных значений перенапряжений на конденсаторе, что недопустимо. Рассмотрим причину этого явления.

Пусть в схеме с параллельным соединением пусковой и удерживающей обмоток (рис. 11, а) имеет место полная магнитная связь обмоток (коэффициент связи равен единице). Тогда индуктивность рассеивания  $L_{\Sigma} = 0$ . При размыкании вспомогательного контакта  $Y$ : электромагнитный ток пусковой обмотки быстро уменьшается, а энергия, запасенная к моменту размыкания в пусковой обмотке, лишь в незначительной части переходит в энергию разряда конденсатора. Большая часть энергии пусковой обмотки переходит в удерживающую обмотку, вследствие чего

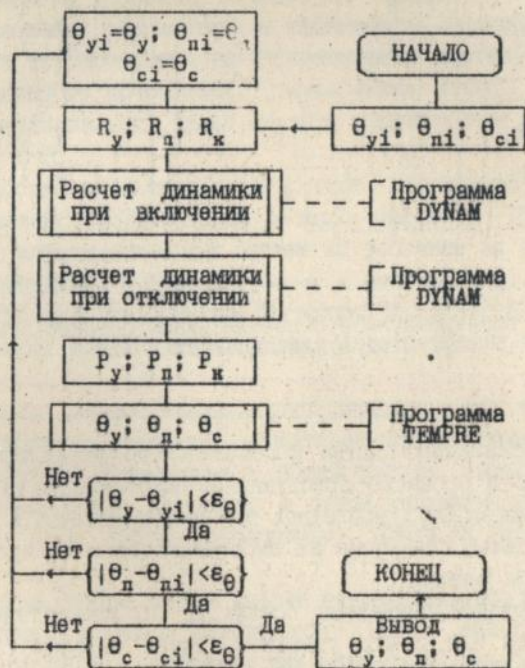


Рис. 10. Схема алгоритма проектирования форсированного электромагнита по условиям динамики.

ток в ней резко (почти скачкообразно) возрастает. При наличии индуктивности  $L_B$  ток в удерживающей обмотке не может возрастать так быстро, поэтому ток в пусковой обмотке падает медленнее, чем при  $L_B = 0$ , что приводит к увеличению напряжения на конденсаторе.

В диссертации приводятся рекомендации по составлению дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы, связанные с зарядом и перезарядом коммутирующего конденсатора при включении и отключении СФУ, а также рекомендации по определению параметров ( $L_B$ ,  $R_K$ ) схем замещения. В качестве примера рассматриваются схемы замещения и переходные процессы при включении (рис. 11, а) и при отключении (рис. 11, б) в СФУ с параллельным соединением пусковой и удерживающей обмоток.

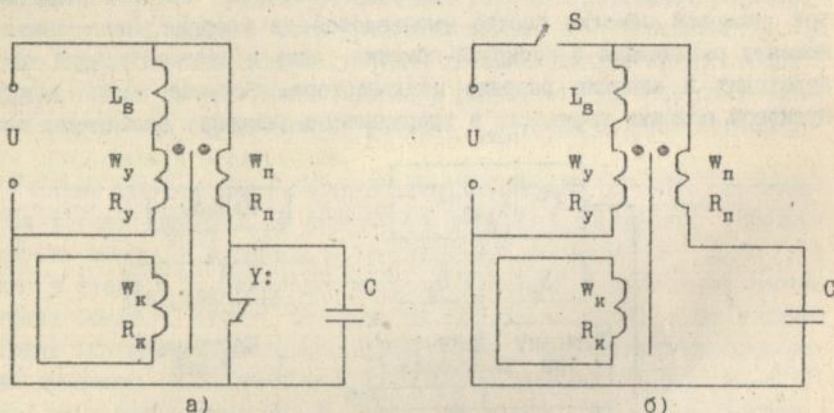


Рис. 11. Схемы замещения к расчету перенапряжений на конденсаторе при включении (а) и при отключении (б) форсированного электромагнита с параллельным соединением пусковой и удерживающей обмоток.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Классификация систем форсированного управления по способу изменения МДС в процессе срабатывания электромагнита и разработка новых эффективных СФУ, пригодных для использования в электрических аппаратах с целью повышения их экономичности и конкурентоспособности на мировом рынке.

В диссертации приведены ссылки на 16 изобретений, сделанных автором работы или с его участием. Всего автором разработано 22 СФУ, защищенных авторскими свидетельствами.

2. Разработка эффективных обобщенных методов анализа и проектирования форсированных электромагнитных систем с учетом взаимосвя-

зей определяющих тепловых и электромагнитных процессов в статическом и динамическом режимах, включающих в себя методы расчета их основных параметров и характеристик, в том числе:

- магнитных проводимостей воздушных зазоров электромагнитов;
- насыщенных магнитных цепей с распределенными параметрами, а также потокоцеплений обмоток форсированных электромагнитов с учетом нелинейных свойств их магнитопроводов;
- нагрева обмоток форсированных электромагнитных систем с учетом влияния пульсаций токов и магнитных потоков, приводящих к появлению добавочных потерь в обмотках и магнитопроводах;
- динамических характеристик форсированных электромагнитных систем с учетом влияния вторичных контуров (в том числе контуров вихревых токов в магнитопроводах) и систем управления;
- коммутационных перенапряжений на обмотках и других элементах (в частности, на искрогасительных конденсаторах) форсированных электромагнитных систем.

При разработке указанных методов использовался математический аппарат, позволяющий разрабатывать эффективные алгоритмы расчета и проектирования форсированных электромагнитных систем, в частности методы вариационного исчисления, метод Монте-Карло, метод сеток для расчета потенциальных полей, методы планирования ортогональных экспериментов и пр.

3. Разработка эффективных алгоритмов, обеспечивающих вычислительную реализацию разработанных методов анализа и проектирования форсированных электромагнитных систем по условиям их работы в статическом и динамическом режимах.

Разработанные в диссертации алгоритмы иллюстрируются схемами, на основе которых могут быть созданы соответствующие машинные программы.

4. Внедрение разработанных в диссертации рекомендаций.

Рекомендации по расчету и проектированию форсированных электромагнитных систем, приведенные в данной работе, использовались при разработке новых серий аппаратов в таких организациях, как НПО ХЭМЗ, АО ЭНАС (бывш. ВНИИЭлектроаппарат), ИПМАШ АН Украины, НПО ФЭД и др.

При участии автора данной работы разрабатывались форсированные электромагнитные системы контакторов КП7 и КП207 (НПО ХЭМЗ), КМ24 и КМ25 (АО ЭНАС), форсунок для двигателей внутреннего сгорания (ИПМАШ), устройств управления гидропривода рулей самолетов (НПО ФЭД).

Системы форсированного управления, разработанные автором диссертации, установлены и эксплуатируются на ряде крупных предприятий Украины и стран СНГ, таких как НПО ХЭМЗ, Завод Запорожсталь и др.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Клименко Б.В. Алгоритм машинного расчета динамики электромагнитов постоянного тока.- В кн.: Низковольтное аппаратостроение. Вып.5.- Чебоксары: ВНИИР, 1978.

2. Клименко Б.В. Интегрирование уравнений динамики электромагнитов при наличии вторичных контуров.- Электричество, 1984, N 11.

3. Клименко Б.В. Исследование температурных и магнитных полей в электромагнитах.- Дисс. канд. техн. наук. Харьков: ХПИ, 1971.

4. Клименко Б.В. Применение метода Монте-Карло для определения проводимостей.- Электричество, 1981, N 2.

5. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы.- М.: Энергоатомиздат, 1989.

6. Клименко Б.В., Долгинский Ю.М. Определение вариационными методами проводимостей между полюсами и осевой симметрией.- Электричество, 1969, N8.

7. Любчик М.А., Дун С.Я., Клименко Б.В. Расчет динамических характеристик электромагнитов с насыщенным магнитопроводом на ЭЦМ.- В кн.: Исследование электрических машин возвратно-поступательного движения. ч.1. (депон.ВИНИТИ N967-69).- Новосибирск, 1969.

8. Устройства управления электромагнитами /Г.В. Могилевский, Б.В. Клименко, Ю.И. Гридин и др.- М.: Информэлектро, 1981.

9. Эффективность применения в контакторах систем форсированного управления с пусковыми обмотками /Б.В.Клименко, Д.М.Зекцер, Е.В.Качанов и др.- В кн. Низковольтные аппараты защиты и управления: Сб. науч. тр. Харьков, 1987.

10. А.с. 773749 СССР. Устройство для форсировки электромагнита постоянного тока контактора переменного тока /К.К.Намитоков, Б.В.Клименко, А.А.Сокол и др.// Б.И., 1980, N 39.

11. А.с. 781987 СССР. Устройство для форсированного включения контактора /К.К.Намитоков, Б.В.Клименко, А.А.Сокол и др.// Б.И. 1980, N 43.

12. А.с. 788192 СССР. Устройство питания электромагнитного привода постоянного тока /К.К.Намитоков, Б.В.Клименко, А.А.Сокол и др.// Б.И. 1980, N 46.

13. А.с. 788193 СССР. Устройство для форсированного включения двухобмоточного электромагнита постоянного тока /К.К.Намитоков,

Б.В.Клименко, А.А.Сокол и др.// Б.И. 1980, N 46.

14. А.с. 796927 СССР. Устройство для включения контактора постоянного тока /К.К.Намитов, Б.В.Клименко, А.А.Сокол и др.// Б.И. 1981, N 2.

15. А.с. 799025 СССР. Устройство для питания электромагнита постоянного тока контактора переменного тока /К.К. Намитов, Б.В.Клименко, А.А.Сокол и др.// Б.И., 1981, N 3.

16. А.с. 817704 СССР. Устройство для форсировки двухобмоточного электромагнита контактора постоянного тока /Б.В.Клименко// Б.И., 1981, N 12.

17. А.с. 826432 СССР. Контактёр переменного тока /К.К. Намитов, Б.В.Клименко, А.А.Сокол и др.// Б.И. 1981, N 16.

18. А.с. 836687 СССР. Электромагнит постоянного тока с форсировкой /Б.В.Клименко, В.Ф.Карпук, Г.Ш.Бер и др.// Б.И. 1981, N 21.

19. А.с. 839764 СССР. Устройство для включения электромагнита постоянного тока с форсировкой /Б.В.Клименко// Б.И. 1981, N 22.

20. А.с. 888220 СССР. Устройство для форсированного включения электромагнита постоянного тока /Б.В.Клименко// Б.И. 1981, N 45.

21. А.с. 907593 СССР. Устройство для управления контактором с залипанием /Б.В.Клименко, Л.Н.Шевырева, Г.Ш.Бер и др.// Б.И. 1982, N7.

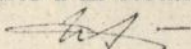
22. А.с. 1159071 СССР. Электромагнит постоянного тока с форсировкой /Б.В.Клименко// Открытия. Изобретения. 1985, N 20.

23. А.с. 1198573 СССР. Электромагнит постоянного тока с форсировкой /Б.В. Клименко, Е.А. Поляков// Открытия. Изобретения. 1985, N 46.

24. А.с. 1372378 СССР. Форсированный электромагнит постоянного тока с питанием от источника переменного напряжения /Б.В.Клименко, В.И.Растворцев, Г.Ф.Шевырев// Открытия. Изобретения. 1988, N 5.

25. А.с. 1372379 СССР. Устройство для форсированного управления электромагнитом постоянного тока с питанием от источника постоянного напряжения /Б.В.Клименко, В.Н.Белосус, Н.П.Старжинский// Открытия. Изобретения, 1988, N 5.

Основные научные положения, изложенные в диссертации, разработаны лично автором диссертации и опубликованы в монографии автора [5]. В работах [6-9], опубликованных с соавторами, автору диссертации принадлежит постановка задачи, математический аппарат, формулировка выводов и текст публикаций. В авторских свидетельствах на изобретения [10-15,17,18,21,23-25] автору диссертации принадлежат идеи предложенных устройств и их обоснование.



Підп. до друку  
Обсяг 2 д.а.

Формат 60 · 84 1/16  
Тираж 120 екз. Заказ N

---

Друкарня АТ ЕНАС

м. Харків, Московський пр., 138,а

462226

**AV 29.802**