

**На правах рукописи**

**ПОТИЕНКО Антон Анатольевич**

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
ФОРМИРУЮЩИХ ЛИНИЙ И ТРЕХФАЗНЫХ КАБЕЛЕЙ  
С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

**Специальность 05.09.05 – теоретическая электротехника**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**Санкт-Петербург**

**2004**

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы электротехники»  
ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук  
профессор Николай Владимирович Коровкин

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
профессор Елена Борисовна Соловьева  
кандидат технических наук  
доцент Михаил Кириллович Ярмаркин

Ведущая организация АО «Электросила»

Защита состоится “\_\_\_” марта 2004г. в “\_\_\_\_\_” часов на заседании диссертационного совета К 212.229.02 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ «СПбГПУ».

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2004г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

А.В. Терешкин

## Общая характеристика работы

Актуальность работы. Класс оптимизационных задач в электротехнике, которые также называют обратными задачами, обширен и разнообразен. Это и задачи параметрического синтеза электрических цепей, когда параметры элементов схемы цепи подбираются из условия минимума некоторого функционала, а результатом оптимизации являются оптимальные в том или ином смысле характеристики цепи (переходные, частотные и т.д.), минимизация потерь, лучшая помехозащищенность и пр. К задачам оптимизации относится также и структурный синтез электротехнических объектов, понимаемый здесь как поиск пространственного распределения, геометрических размеров, взаиморасположения частей и элементов оптимизируемого устройства. В этом случае понятие оптимальности может иметь самый широкий смысл, от минимума энергетических потерь и улучшения электрических характеристик объекта до минимума габаритов, веса конструкции или экономических затрат. При решении оптимизационных задач в электротехнике приходится сталкиваться с трудностями, обусловленными рядом особенностей, усложняющих их решение. В первую очередь это обычное наличие многих локальных экстремумов у минимизируемого функционала, его недифференцируемость в ряде случаев, а также вероятная жесткость оптимизационной задачи. Эти особенности усложняют процесс оптимизации. Следует отметить также быстрое усложнение процесса решения с увеличением числа переменных оптимизации  $n$ , которое в современных задачах оптимизации исчисляется десятками. Классические методы, основанные на вычислении антиградиента по всем оптимизируемым переменным часто несостоятельны при решении подобных задач. Поэтому представляется актуальным исследование возможности использования для решения оптимизационных задач в электротехнике альтернативных эволюционных методов, активно развивающихся в последние десятилетия и в первую очередь генетического алгоритма (ГА), как наиболее известного эволюционного метода оптимизации.

Решение ряда актуальных задач, таких как синтез оптимальных искусственных формирующих линий, оптимизация ЭМС-свойств трехфазных токоведущих систем градиентными методами встречает значительные трудности, вы-

званные их перечисленными выше особенностями. В то же время, проблемы применения для решения этих и подобных задач ГА мало исследованы к настоящему времени. Указанные задачи обладают всеми типичными свойствами обратных электротехнических задач, поэтому результаты и выводы, полученные при их решении, могут иметь не только прикладное, но и общетеоретическое значение для развития вычислительных методов теоретической электротехники, что также делает актуальным их исследование.

Целью работы является разработка и исследование современных методов оптимизации, основанных на ГА, методики применения ГА для решения обратных электротехнических задач, применительно к задачам параметрического синтеза схем замещения длинных линий, искусственных формирующих линий во временной и частотной областях, а также оптимизации трехфазного кабеля из условий минимума внешнего магнитного поля и минимума потерь.

Для достижения поставленной цели необходимо

- исследовать возможность использования ГА оптимизации для решения электротехнических задач, определить характерные признаки задач, для решения которых градиентные методы не эффективны, реализовать идеи эволюционных методов оптимизации, определить список настроечных параметров ГА и решить ряд классических тестовых задач для определения оптимальных значений параметров ГА при решении практических электротехнических задач;
- разработать и реализовать методики оптимизации с помощью ГА схем замещения длинных линий по переходной и частотной характеристике, а также методы параметрического синтеза искусственных формирующих линий для получения импульса, близкого к прямоугольному, с учетом основных конструктивных особенностей практического исполнения формирующих линий;
- разработать методы оптимизации двойных формирующих линий на основе неравномерного разбиения линии на участки и на основе поэлементного параметрического синтеза;
- выполнить оптимизацию структуры трехфазного многожильного кабеля, исходя из условий минимума внешнего магнитного поля, создаваемого кабелем и минимума потерь в жилах кабеля, а также оптимизацию формы жил трехфазно-

го кабеля из условия минимума потерь в жилах кабеля.

Методика проведения исследований. Использовались эволюционные методы оптимизации, метод секущих (метод Пауэлла), методы переменных состояния и синтетических схем, а также математические пакеты и разработанные автором программы для проведения аналитических преобразований.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- показана возможность успешного использования ГА при решении оптимизационных задач в электротехнике, обоснованы преимущества ГА по сравнению с градиентными методами оптимизации, а также предложены модификации ГА, повышающие эффективность его применения;
- предложен и исследован новый подход к оптимизации схем замещения длинных линий и двойных формирующих линий, основанный на неравномерном разбиении линии на участки, эквивалентные каждому звеном схемы замещения;
- разработана методика оптимизации структуры трехфазного многожильного кабеля с помощью ГА, для различных критериев оптимальности.

Практическое значение работы заключается в:

- разработке методов и создании основанных на ГА программ оптимизации формирующих линий расщепленных трехфазных токоведущих систем;
- создании методики определения наилучших параметров метода ГА из свойств конкретной задачи.

Апробация работы выполнена на: межд. симп. по ЭМС (PIERS-94, Нордвик.), 12-м межд. н.-т. конф. ИЭЭ по имп. технике (IEEE Int. Symp. PPC-99, Монтерей), 11-м межд. симп. по высоковольтной технике (Int. Symp. ISH-99, Лондон), 4-м между. симп. по ЭМС, (ЭМС-01, СПб.), а также на научных семинарах каф. ТОЭ СПбГПУ и в 10 печатных работах.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из четырех глав, заключения и библиографии. Содержание изложено на 127 с., из них машинописного текста 121 с., включая рисунков 48 шт., таблиц 24 шт., библиографический список из 58 наименований – 6 с.

## Содержание работы

В первой главе рассмотрены особенности оптимизационных задач в электротехнике, сравнительный анализ градиентных и эволюционных методов оптимизации, а также приведены решения тестовых оптимизационных задач и очерчен круг практических задач, рассматриваемых в работе.

Современные методы оптимизации, при всем их многообразии, можно разделить на классические (или как они будут называться в данной работе, градиентные) и эволюционные (или «мягкие») методы оптимизации. «Родовым признаком» классических методов оптимизации (методы градиентного спуска, наискорейшего спуска, Ньютона, секущих и др.) является вычисление градиента оптимизируемого функционала в окрестности текущей рабочей точки и наличие на каждом шаге оптимизации единственной рабочей точки, которая и есть текущее решение задачи. Для классических методов, требующих дифференцируемости функционала, характерны быстрая сходимость вблизи локального минимума, универсальность и простота, но и, одновременно, трудности поиска глобального экстремума в случае задач с локальными экстремумами и проблемы при оптимизации «жестких» функционалов.

Альтернативные градиентным – эволюционные методы оптимизации, используют для нахождения минимума функционала работу не с одной рабочей точкой (особью), а с их множествами (популяциями). Внутри каждого поколения (популяции) индивиды (особи) оцениваются, и, в зависимости от оценки, участвуют в размножении – создании новой популяции. Алгоритм стартует с некоторой популяции и далее генерирует их последовательность с улучшающимися с точки зрения выбранного критерия свойствами. Основные преимущества эволюционных методов: на минимизируемый функционал не накладываются условия дифференцируемости, вектор варьируемых переменных может содержать дискретные и непрерывные переменные, естественным образом решается проблема ограничения переменных, слабая зависимость количества вычислений от степени «жесткости» задачи, работа на каждом шаге ведется одновременно с множеством рабочих точек (популяцией), что делает возможным нахождение глобального экстремума, а также «робастность» этого алгоритма

оптимизации. Основным недостатком эволюционных методов является их относительно медленная сходимость вблизи локального экстремума.

ГА оптимизации, являющийся наиболее известным и используемым эволюционным методом, основываясь на идеях эволюционной теории Ч.Дарвина, моделирует процесс развития популяции живых организмов, с присущими ему законами наследственности, изменчивости, закрепления в потомках благоприятных признаков и доминированием сильнейших. Каждая рабочая точка в пространстве оптимизируемых переменных  $\{a_i\}_n$  называется хромосомой, а переменные  $a_i$ , генами. Значение функционала – фитнес-функция и служит в ГА показателем жизнестойкости данной особи. Понятие особи включает в себя пару: хромосома + фитнес-функция (рис. 1а), а совокупность всех особей образует популяцию. На каждом шаге ГА на основе текущей популяции (популяции родителей) происходит генерация новых особей – потомков. Для поколения потомков вычисляются фитнес-функции, проводится селекция, худшие особи отбрасываются, а лучшие составят популяцию на следующем шаге оптимизации, т.е. образуют новое поколение (см. рис. 1б). Таким образом, моделируется существующий в живой природе естественный отбор и выживание сильнейших по определенным признакам особей. Начальное поколение генерируется в общем случае случайным образом. Особь, обладающая лучшим значением фитнес-функции на данном шаге, является текущим решением задачи.

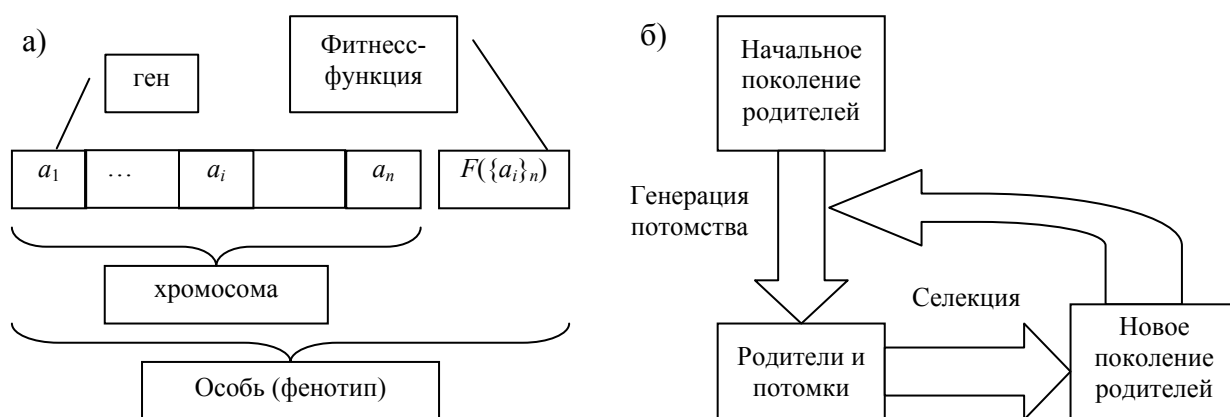


Рис. 1 а) особь в генетическом алгоритме,  
б) цикл генерации нового поколения в генетическом алгоритме

В классическом ГА генерация потомков осуществляется с помощью од-

ноточечного кроссовера (скрещивания) пары родителей, когда хромосомы родителей разрываются в одной случайной точке и полученные участки сшиваются крест-накрест в хромосомах двух потомков (рис. 2а). Выбор родителей в текущем поколении происходит случайным образом или по «правилу рулетки». Для появления новых генов в хромосомах потомков используется мутация, когда некоторые гены в хромосоме особи, изменяются (рис. 2б) на случайную величину  $\delta$ . Мутации подвергаются потомки, полученные методом кроссовера, однако возможен вариант, когда некоторая (небольшая) часть потомков генерируется непосредственно мутацией одного родителя.

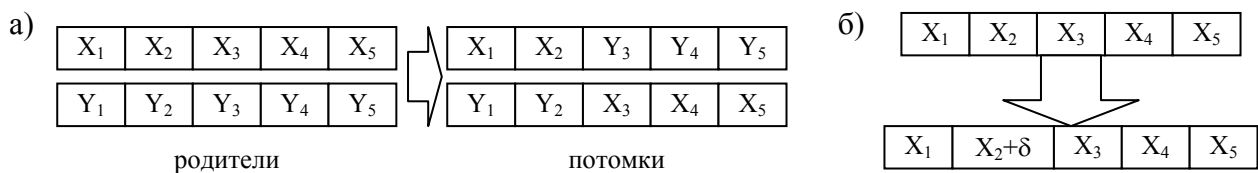


Рис. 2 Одноточечный кроссовер (а) и механизм мутации (б)

Используемые в работе модификации ГА применяют механизм многоточечного кроссовера, когда хромосомы родителей разрываются в более чем одной точке ( $(n-1)$ -точечный кроссовер). Следующие два вида модификации ГА связаны с механизмом выбора родителей и носят названия "элитизм" и "антиинцест". При реализации "элитизма" выделяется небольшая группа из числа родителей с лучшими показателями (элита), для которой увеличивается вероятность выбора в качестве родителя, что увеличивает скорость сходимости алгоритма, но, одновременно, несколько увеличивает риск быстрого вырождения популяции. Размер элиты и вероятность использования ее членов в производстве потомков – настраиваемые параметры ГА. Для предотвращения вырождения в работе предложен алгоритм «антиинцеста», заключающийся в предварительной проверке потенциальных родителей на «родственность». Совпадение их генотипов должно быть меньше заданной «нормы антиинцеста», также настраиваемого параметра ГА.

В работе также предложен механизм получения потомства, названный автором "направленной мутацией", который совмещает принципы скрещивания и мутации при генерации потомков, а также достоинства генетического и гради-



ентного подходов. Направленная мутация заключается в оценке величины антиградиента  $n$ -мерной плоскости, построенной по  $(n+1)$  особям, выбранным из текущего поколения родителей. В полученном направлении антиградиента осуществляется мутация каждого родителя. Отличие предлагаемого подхода от градиентных методов, состоит в том, что особи для скрещивания выбираются из популяции случайно и, в общем случае, не близки между собой. Поэтому, в особенности на ранних этапах развития популяции, оценивается не локальное значение градиента, а крупномасштабный наклон области поиска экстремума.

В настоящей работе с помощью ГА решен ряд классических тестовых оптимизационных задач, и показано значительное преимущество ГА при поиске глобального экстремумов функции Растригина и функции Экли по сравнению с градиентными методами. Решение этих задач позволило выработать рекомендации по определению параметров ГА. Если  $n$  – число переменных, то размер популяции следует задавать не менее  $100n$ , а число родителей – порядка  $(10-20)n$ . Оптимальное соотношение способа получения потомков: скрещивание 70%, направленная мутация 20%, почкование 10% от общего числа потомков, вероятность мутации при почковании 0.1-0.5, величина мутации до  $\pm 5\%$ . Таким образом, хромосома потомка будет иметь несколько новых генов, но близких генам родителя. Для потомков, полученных кроссовером, напротив, целесообразно подвергать мутации небольшой (до 10%) процент генов, однако величина мутации должна быть существенно большей (до 50%), что обеспечит появление особей, значительно отличающихся по генному набору.

Во второй главе рассмотрена задача оптимизации схем замещения длинных линий во временной и в частотной областях.

Традиционная схема замещения получается при разбиении линии по длине на одинаковые участки и замене каждого участка Т- или П-образным звеном. В работе предложено синтезировать схему замещения длинной линии, разбивая ее на неравные участки с оптимальными длинами при следующих условиях: 1) равенство суммы длин всех участков длине линии; 2) симметричные относительно середины линии участки имеют одинаковую длину; 3) звенья схемы замещения симметричны, а их параметры однозначно определяются длиной со-

ответствующего участка - варьируемой переменной. Количество варьируемых переменных  $n$  связано с числом звеньев  $m$  соотношением  $n = \text{entier}((m-1)/2)$ .

Оптимизации переходной характеристики по напряжению схемы замещения линии выполнялась для линии без потерь длиной  $l=1\text{м}$  с параметрами  $L=1\text{Гн}$  и  $C=1\text{Ф}$ , нагруженной на волновое сопротивление  $z_w = \sqrt{L/C}=1\text{Ом}$ . Минимизировался функционал вида:

$$F(\{x_i\}_n) = \frac{1}{T} \int_0^T |i_{c3}(t, \{x_i\}_n) - i(t)| dt \xrightarrow{\{x_i\}_n} \min, \quad (1)$$

где  $\{x_i\}_n$  – вектор варьируемых переменных,  $i_{c3}$  – ток нагрузки,  $i=1(t-t_n)$  – ток на выходе линии,  $t_n = \sqrt{LC} = 1\text{с}$  – время пробега волны вдоль линии,  $T=3t_n$  – интервал интегрирования.

Для схем с  $n < 5$  задача (1) решалась градиентным методом (метод секущих), для схем с большим числом звеньев решение удалось получить только с помощью ГА. В табл.1 приведены полученные в результате оптимизации относительные длины участков линии для Т-образных схем замещения с числом звеньев от 3 до 10, а на рис.3 – переходные характеристики для  $n=10$ .

Табл. 1 Оптимальное разбиение линии на участки для Т-образных схем замещения

$m$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
3	0.852	-	-	-
4	0.830	-	-	-
5	0.787	1.215	-	-
6	0.795	1.246	-	-
7	0.814	1.291	0.957	-
8	0.811	1.333	0.974	-
9	0.847	1.367	0.997	0.875
10	0.896	0.728	1.323	0.726

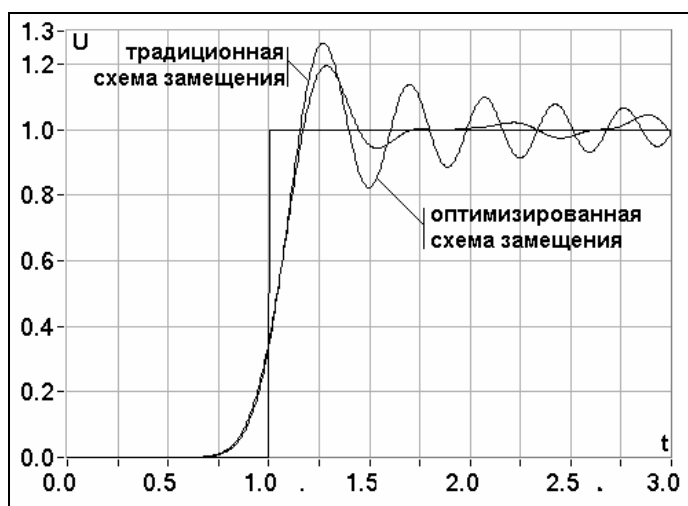


Рис 3. Переходные характеристики 10-звенных Т-образных схем замещения при оптимизации во временной области

Задача оптимизации схемы замещения может быть решена и в частотной области. Тогда  $K_U = U_2/U_1$ , где  $U_1$  и  $U_2$  – входное и выходное напряжения и, для получения оптимальной частотной характеристики коэффициента передачи по напряжению

$$K_U = \frac{z_w}{Az_w + B} \quad (2)$$

схемы замещения будем минимизировать отличие  $K_U$  от функции  $e^{-j\omega\sqrt{LC}}$ :

$$F(\{x_i\}_n) = \frac{1}{\Omega} \int_0^{\Omega} \left| K_U - e^{-j\omega\sqrt{LC}} \right| d\omega \xrightarrow{\{x_i\}_n} \min. \quad (3)$$

Для получения матрицы А-параметров схемы замещения необходимо перемножить матрицы А-параметров ее звеньев. Каждый из А-параметров схемы замещения представляет из себя полином, элементы которого имеют вид

$$P \cdot \omega^q \cdot \prod_{i=1}^n x_i^{s_i}. \text{ Для аналитических вычислений с полиномиальными матрицами}$$

была реализована программа, рассчитывающая результирующие элементы матрицы А-параметров всей схемы замещения.

В знаменателе (2) стоит полином, зависящий от  $j\omega$ , причем в  $A$  содержится его вещественная, а  $B$  – мнимая часть, что позволяет представить (3) в виде:

$$F(\{x_i\}_n) = \frac{1}{\Omega} \int_0^{\Omega} \sqrt{\left( \frac{A}{A^2 + B^2} - \cos\omega \right)^2 + \left( \frac{B}{A^2 + B^2} - \sin\omega \right)^2} d\omega \xrightarrow{\{x_i\}_n} \min \quad (4)$$

При вычислении интеграла в (4) пришлось решать ряд проблем вычислительного характера. Это определение верхнего предела  $\Omega$ , значение которого было невозможно жестко задать заранее (это приводило к получению неоптимального решения), а также наличие у подынтегральной функции узких и высоких пиков, положение которых по оси частот также менялось в зависимости от вектора варьируемых переменных и учет которых создавал вычислительные трудности и сильно увеличивал объем вычислений. Поэтому перед каждым вычислением функционала проводился предварительный анализ стоящего в знаменателе выражения  $A^2 + B^2$ . Верхний предел интегрирования  $\Omega$  находился, как максимальный вещественный корень уравнения  $A^2 + B^2 - 1 = 0$  по  $\omega$ , а нахождение корней уравнения  $A^2 + B^2 - 0.1 = 0$  позволило выделить промежутки интегрирования по частоте, на которых подынтегральная функция имеет высокие пики, интегрирование проводилось отдельно по полученным промежуткам.

В табл.2 приведены результаты оптимизации в частотной области для длин участков линии для Т-образных схем замещения с числом звеньев от 3 до 10.

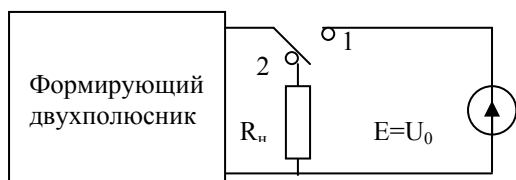
Табл. 2 Оптимальное разбиение линии на участки для Т-образных схем замещения (при оптимизации в частотной области)

$m$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
3	0.918	-	-	-
4	0.894	-	-	-
5	0.875	1.118	-	-
6	0.866	1.116	-	-
7	0.868	1.114	1.013	-
8	0.875	1.110	1.016	-
9	0.862	1.145	1.034	0.986
10	0.879	1.101	1.027	1.038

Оптимизация в частотной области носит более универсальный характер, однако, при известной технической постановке задачи предпочтительнее проводить оптимизацию во временной области, что, как показали исследования, дает лучшую переходную характеристику.

В третьей главе решена задача параметрического синтеза формирователя на искусственных формирующих линиях. При работе формирователя (рис. 4а) происходит медленное запасание энергии (ключ в положении 1) и, затем, передача запасенной энергии нагрузке  $R_n$  (ключ в положении 2). При этом на нагрузке формируется импульс амплитуды  $U_0/2$ , длительность  $t_u$  которого определяется только параметрами двухполюсника.

а)



б)

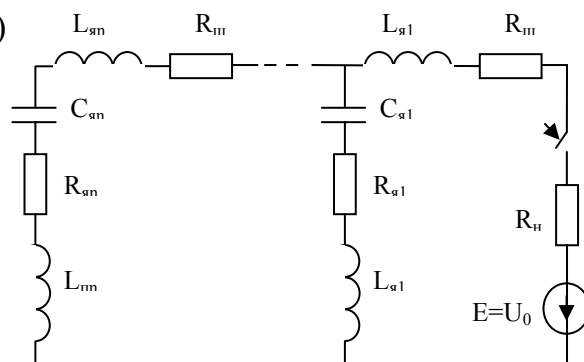


Рис. 4 а) схема формирующего накопителя энергии; б) эквивалентная схема линии.

В каждой ячейке схемы искусственной формирующей линии (рис. 4б), где в качестве емкостных накопителей  $C_я$  используются стандартные секции импульсных конденсаторов, а соединительные шины играют роль индуктивностей  $L_я$ , в силу конструктивных особенностей появляются активные сопротивления и поперечные индуктивности  $L_n$ , значительно ухудшающие форму импульса и требующие их учета в процессе оптимизации.

Задача оптимизации формулировалась, как максимальное приближение формируемого линий импульса к идеальному  $0.5U_0[1(t) - 1(t - t_{um})]$ :

$$F(\{L_i, C_i\}_m) = \frac{1}{T} \int_0^T |U_n(t, \{L_i, C_i\}_m) - U_u(t)| dt \xrightarrow{\{L_i, C_i\}_m} \min, \quad (5)$$

где  $m$  – число ячеек,  $\{L_i, C_i\}_m$  – вектор варьируемых переменных,  $U_n$  и  $U_u$  – формируемый и идеальный импульсы,  $T=2t_u$ ,  $t_u$  – длительность импульса.

Чтобы решить задачу (5) градиентным методом пришлось наложить на вектор варьируемых переменных следующие ограничения: 1) емкости и индуктивности ячеек должны быть положительными, 2) параметры  $k+1$ -й ячейки должны быть больше или равны соответствующим параметрам  $k$ -й ячейки, 3) параметры ячеек должны отличаться от начальных условий не более чем в  $q$  раз в большую или меньшую сторону (значение  $q$  задается априори, в данной задаче было принято  $q=10$ ). Эти ограничения решались вводом новых переменных:

$$L_1 = x_1^2, C_1 = x_2^2, L_k = L_{k-1} + x_{2k-1}^2, C_k = C_{k-1} + x_{2k}^2, k=2 \dots m, \quad (6)$$

а также использованием штрафных функций.

Задача (5) решена для двух вариантов соединения конденсаторных секций в пакет: при «соединении фольгой секций» величина поперечной индуктивности  $L_n$  пропорциональна основной индуктивности ячейки  $L_{я}$ , а при соединении «выводами по торцам секций»  $L_n = const$ . Для различных вариантов конструктивного исполнения формирующих линий были получены оптимальные параметры для числа ячеек линии от 3 до 10. Данная задача решалась совместно с группой проф. Г.С.Кучинского кафедры ТВН ЭлМФ СПбГПУ. Рис. 5 представляет типичные результаты оптимизации.

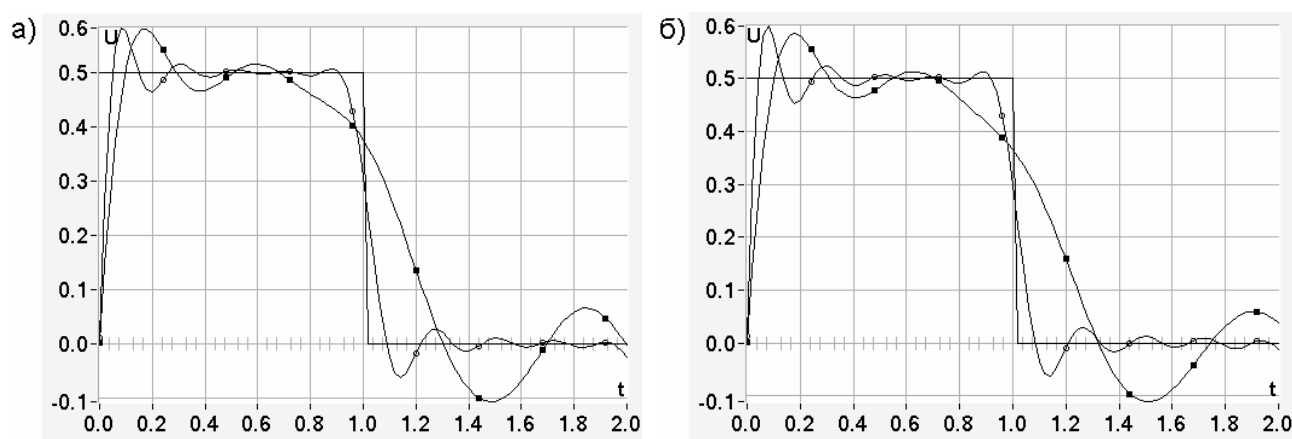


Рис. 5 Импульс на нагрузке, полученный при помощи оптимизированных

5-тиячеечных формирующих линий с а)  $k_n=0.25$  и б)  $L_n=const=1/3 L_{я-одн}$

— - идеальный импульс, —■— - однородная линия, —○— - оптимизированная линия

Для формирования на нагрузке импульса амплитуды  $U_0$  применяют двойные формирующие линии (рис. 6), формирующие на нагрузке прямоугольный импульс длительности, равной двойному времени пробега волны вдоль линии.

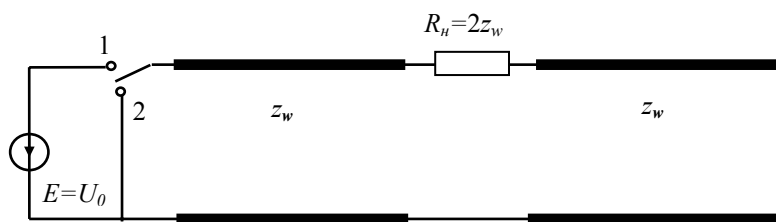


Рис. 6 Схема двойной формирующей линии

В работе исследовались два подхода. В первом, при общем числе варьируемых переменных  $n=2(m-1)$ , закорачиваемая линия составлялась из  $m$  Т-образных, а разомкнутая из  $m$  П-образных звеньев, причем условие симметричности не накладывалось. Во втором подходе осуществлялся поэлементный параметрический синтез линий, при котором каждая линия состояла из  $m$  Г-образных звеньев и общее число варьируемых переменных составляло  $n=4m$ .

Оптимизируемый функционал имеет вид

$$F(\{L_i, C_i\}_m) = \frac{1}{T} \int_0^{4\tau} |U_n(t, \{L_i, C_i\}_m) - U_u(t)| dt \xrightarrow{\{L_i, C_i\}_m} \min, \quad (7)$$

где  $\tau$  время пробега волны вдоль линии. Для обоих подходов были получены оптимальные двойные формирующие линии при  $m=3-10$ . Типичные результаты приведены на рис. 7.

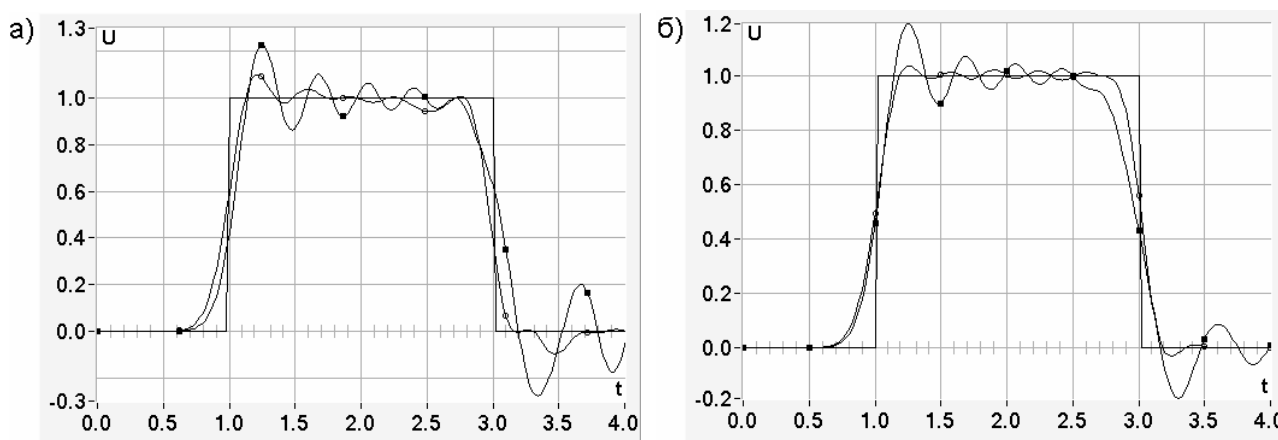


Рис. 7 Импульс на нагрузке для двойных формирующих линий для  $m=10$ , а) оптимизированных по длинам звеньев и б) оптимизированных поэлементно, где — - идеальный импульс, —■— - однородные линии, —○— - оптимизированные линии

Оптимальные распределения длин, полученные ГА, обладают характерной качественной особенностью, состоящей в чередовании длинных и коротких звеньев. Градиентные методы, требующие для устойчивого решения выполнения условий (6), не позволяют получить эти оптимальные решения, что подтверждает преимущества ГА при решении задач с большим числом локальных экстремумов.

Расчеты показали значительные преимущества поэлементного параметрического синтеза двойных формирующих линий. Следует рекомендовать именно этот подход при решении подобных задач параметрического синтеза.

В четвертой главе работы рассмотрена оптимизация трехфазного многожильного кабеля и оптимизации формы жил трехфазного кабеля.

Конфигурация многожильного трехфазного кабеля радиуса  $R$  изображена на рис. 8а). Жилы, образующие фазу А, В и С закрасены белым, серым и черным цветом соответственно. Предполагается, что каждая жила фазы имеет собственное изоляционное покрытие. Расположение жил по сечению кабеля таково, что фазы симметричны в электромагнитном отношении. Положение жил в кабеле неизменно и предметом оптимизации является то, к какой из фаз (А, В или С) подключена каждая жила, общее число переменных  $n$  равно числу жил в одной трети кабеля.

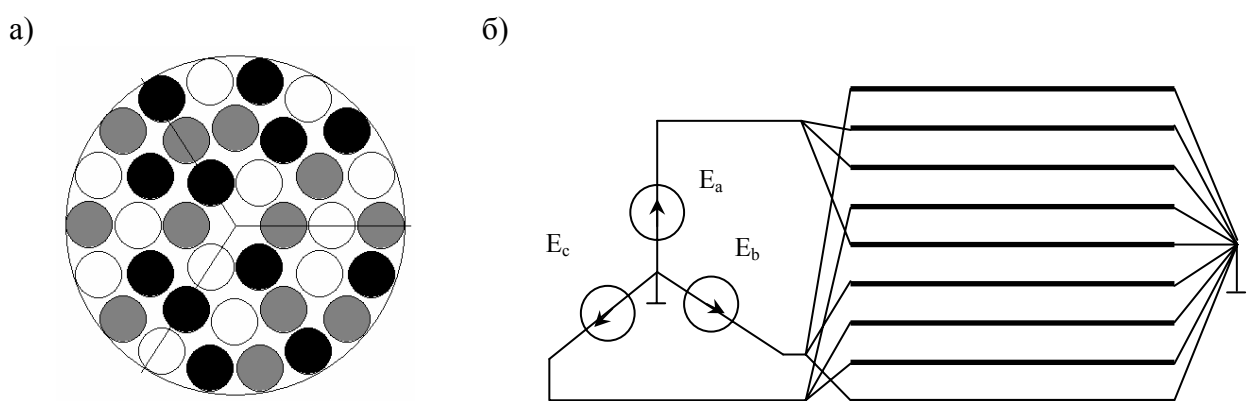


Рис. 8 а) сечение трехфазного многожильного кабеля при  $n=12$ , б) расчетная схема

Рассмотрим задачу минимизации внешнего магнитного поля, создаваемого током кабеля, решение которой соответствует кабелю, создающему наименьшие помехи. Исходя из принципа взаимности, такой кабель будет одно-

временно наиболее помехозащищен в магнитном поле созданном трехфазной системой токов. Минимизируемый функционал имеет вид

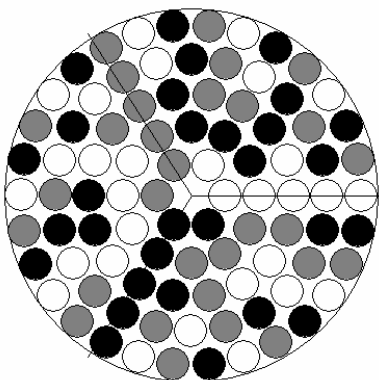
$$F(\{x_i\}_n) = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{T} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} \int_0^T \left| \vec{H}(R_0, \varphi, \{x_i\}_n, t) \right| dt d\varphi, \quad (8)$$

где напряженность магнитного поля  $\vec{H}$  вычислялась, как векторная сумма магнитных полей, созданных токами каждой из жил кабеля. Вследствие симметричности кабеля распределение модуля магнитного поля одинаково по каждой трети окружности, поэтому верхний предел интегрирования равен  $2\pi/3$ . Радиус  $R_0$ , на котором рассчитывалось поле, был выбран  $R_0 = 1.5R$ . Поскольку распределение тока не зависит от нагрузки кабеля (она предполагается симметричной), то токи  $\mathbf{I}$  удовлетворяют системе уравнений (рис. 8б):

$$(\mathbf{R} + j\omega \mathbf{M}) \cdot \mathbf{I} = \mathbf{E}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{R}$  матрица активных сопротивлений жил,  $\mathbf{M}$  матрица собственных и взаимных индуктивностей жил,  $\mathbf{E}$  вектор источников э.д.с.,  $\omega$  круговая частота, значение которой выбиралось из условия  $R = \sqrt{2/\omega\mu\gamma}$  равенства радиуса кабеля эквивалентной глубине проникновения. Дискретность значений варьируемых переменных определила выбор ГА для решения задачи (8). Результат минимизации внешнего магнитного поля для кабеля с числом жил  $n=30$  показан на рис. 9. В результате минимизации внешнее поле уменьшено  $\sim 10$  раз.

а)



б)

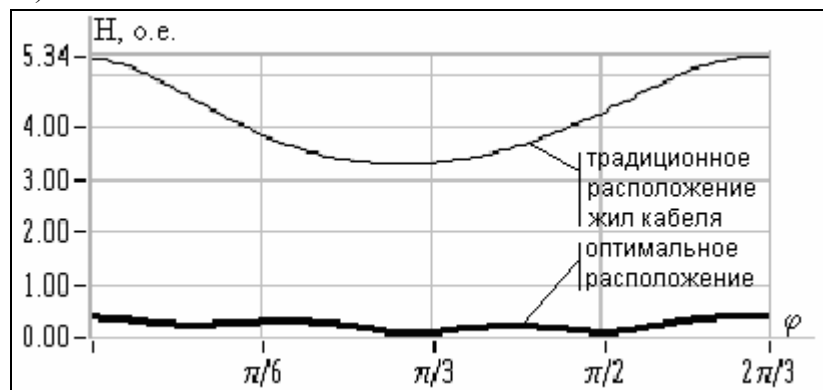


Рис. 9 а) оптимальные распределения фаз по жилам кабеля и б) распределение напряженности внешнего поля для  $n=30$  при решении задачи (8)

Вторая постановка задачи – оптимизация кабеля из условия минимума активных потерь в жилах, достигающегося, как известно, при равномерном



распределении тока по жилам фаз. Поэтому в процессе оптимизации минимизировались не сами токи, а отклонение их от среднего значения  $I_{cp}$ :

$$F(\{x_i\}_n) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (I_k - I_{cp})^2} \xrightarrow{\{x_i\}_n} \min, \quad (10)$$

На рис. 10 показаны типичные результаты решения (10) – распределение жил по сечению кабеля и соответствующие им распределение токов для  $n=30$ . В результате минимизации функционал (10) уменьшался в  $\sim 5$  раз.

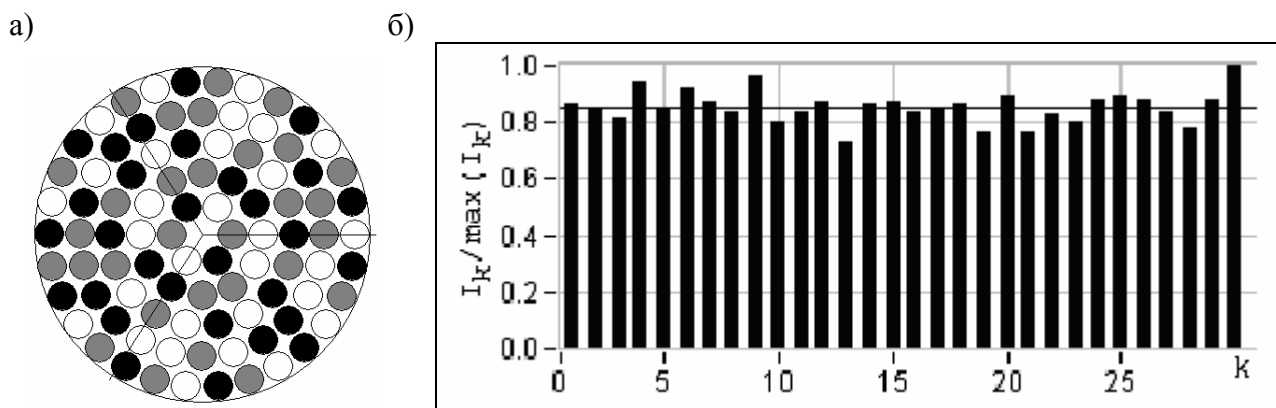


Рис. 10 а) оптимальные распределения фаз по жилам кабеля и б) распределение токов по жилам фазы для  $n=30$  при решении задачи (10)

При нахождении оптимальной формы жилы трехфазного кабеля его поперечное сечение разбивалось на сегменты, как и в предыдущих задачах. Каждый сегмент был заполнен либо материалом жилы либо диэлектриком, при этом количество сегментов, занятых жилой к общему количеству участков было равно задаваемому коэффициенту заполнения  $k_z$ , а общее число сегментов определяло в данном случае степени дискретизации формы жилы. Критерием оптимизации здесь также служила минимальность потерь в жилах (9).

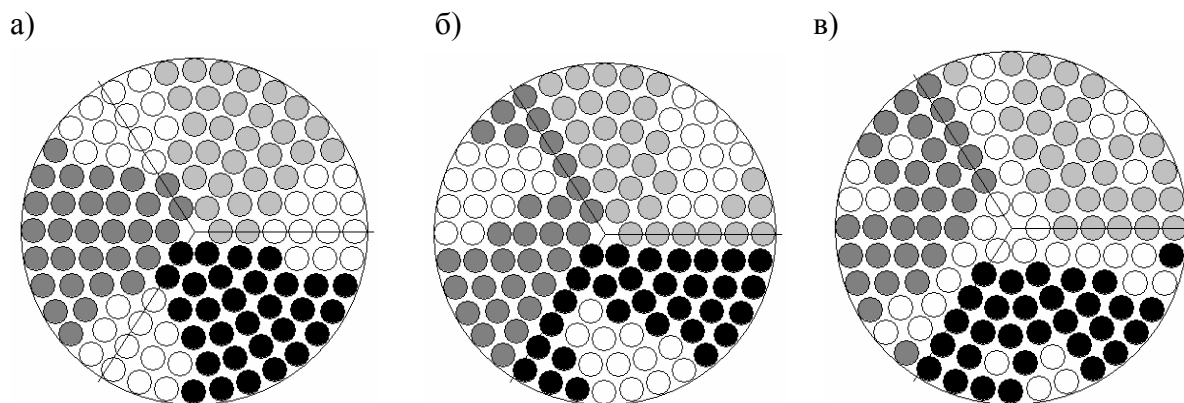


Рис. 11 Оптимальная форма жил кабеля с  $k_\phi=0.7$

На рис. 11 показаны полученные в результате оптимизации формы жил кабеля для случаев разной степени проявления поверхностного эффекта: от практически его отсутствия (а) до ярко выраженного (в).

## Основные результаты работы

1. Разработана и исследована методика использования ГА при решении электротехнических оптимизационных задач, выработаны рекомендации по применению и настройке ГА, применительно к этим задачам с учетом их свойств и особенностей постановки, создан комплекс программ решения оптимизационных задач, реализующий предложенные в работе модификации ГА. Показаны преимущества использования ГА для решения обратных электротехнических задач, сводящихся к поиску глобального экстремума функционалов различного типа, при дискретных и непрерывных варьируемых переменных.
2. Решена задача оптимизации схем замещения длинных линий во временной и в частотной областях, получены оптимальные наборы длин участков линии, эквивалентированных одним звеном схемы замещения. Переходные и частотные характеристики оптимизированных схем значительно улучшены по сравнению с характеристиками неоптимизированных традиционных схем замещения. Полученные решения обладают рядом качественных отличий от решений, получаемых градиентными методами и не могут быть получены последними.
3. Решена задача параметрического синтеза одинарных и двойных искусственных формирующих линий, найдены оптимальные, с точки зрения формы получаемого импульса, значения параметров линий с числом ячеек от 3 до 10. Использование оптимальных параметров ячеек позволило формировать импульс, намного ближе к идеальному, чем у однородных формирующих линий.
4. Решены задачи оптимизации трехфазного многожильного кабеля из условий минимума магнитного поля, создаваемого кабелем, и минимума потерь в кабеле, найдены оптимальные формы жил трехфазной токоведущей системы из условия минимума потерь. В результате оптимизации внешнее поле уменьшилось в среднем в 10 раз, потери в жилах уменьшились в среднем в 5 раз для кабелей с различным числом жил.

По материалам диссертации опубликованы работы:

1. Коровкин Н.В., Потиеенко А.А., Чечурин В.Л. Обратные задачи в электротехнике и их численное решение. - СПб.: - Нестор, - 2003, - 155с.
2. Коровкин Н.В., Потиеенко А.А. Использование генетического алгоритма для решения электротехнических задач // Электричество, - 2002, - №11, - с.2-16.
3. Кучинский Г.С., Шилин О.В., Вехорева Л.Т., Кожевников М.Н., Коровкин Н.В., Селина Е.Е., Потиеенко А.А. Мощные неоднородные формирующие линии высокого напряжения микро- и наносекундного диапазона // Электричество, - 1999, - №8, - с.24-33.
4. Korovkin N.V., Potienko A.A., Plaks A.E., Selina E.E Modeling problems of pulse processes in the transmission lines with the equivalent circuits // Proc. of PIERS-94, - Noordwijk, The Netherlands, - 1994.
5. Кучинский Г.С., Шилин О.В., Вехорева Л.Т., Кожевников М.Н., Коровкин Н.В., Селина Е.Е., Потиеенко А.А. Мощные неоднородные формирующие линии высокого напряжения микро- и наносекундного диапазона. Электротехника и электроэнергетика // Проблемы управления электроэнергетическими системами. Труды СПбГТУ, №471, - 1998. - с.58-69.
6. Коровкин Н.В., Потиеенко А.А. Синтез трехфазного кабеля с минимальным внешним электромагнитным полем с помощью генетического алгоритма // В сб. Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий. - СПб. - СПбГПУ, - 2002, - с.84-90.
7. Коровкин Н.В., Потиеенко А.А., Хаякава М., Ли С. Синтез формирующих линий с помощью генетического алгоритма // IV Межд. симп. по ЭМС и электромагнитной экологии, ЭМС-2001, - СПб, - 2001, - с.273-278.
8. Kuchinsky G.S., Kozhevnikov M.N., Shilin O.V., Vekhoreva L.T., Korovkin N.V., Selina E.E., Potienko A.A. Nanosecond forming line based on compact power high-voltage pulse capacitors // High Voltage Engineering Sym., London UK 22-27 August 1999, - Publ. №467, - 1999, - p.5.429.P6.
9. Kuchinsky G.S., Kozhevnikov M.N., Shilin O.V., Vekhoreva L.T., Korovkin N.V., Selina E.E., Potienko A.A. Compact power high-voltage pulse capacitor for quasi-rectangular nanosecond impulses formation // Abstracts of 12<sup>th</sup> IEEE Int. Pulsed Power Conference, California USA 27-30 June 1999, - p.W-150.
10. Korovkin N.V., Potienko A.A., Hayakawa M. Optization of EMC-properties of a symmetric multithread 3-phase cable // 2004 International Symposium on EMC, Sendai Japan, 1-4 June 2004, (accepted)