

## О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ЭЦВМ

Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ, А. С. ГИТМАН

(Работа представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

После появления электронных цифровых вычислительных машин (ЭЦВМ) в области проектирования электрических машин наступил новый этап. Если раньше инженер-расчетчик, получив более или менее удовлетворительный вариант расчета электрической машины, прекращал дальнейший поиск, то использование ЭЦВМ значительно расширило возможности при проектировании. Особенно привлекательным стало применение ЭЦВМ для проектирования серий электрических машин с поиском оптимальных вариантов. Первая такая работа была начата во ВНИИЭМ в 1956 году при разработке асинхронных двигателей серии АО 2. С этой поры прошло около 10 лет, и сейчас можно подвести некоторые итоги и рассмотреть проблемы, которые все еще остаются нерешенными.

За короткий промежуток времени для проектирования электрических машин было предложено большое количество математических методов и значительно выросло количество измерений пространства, в котором производится поиск оптимума. Совершенно очевидно, что расширение использования математических методов было тесно связано с появлением более мощных ЭЦВМ. Если при проектировании серии АО 2 поиск оптимума производился в пространстве трех-четырёх измерений, то сейчас решаются задачи в пространстве семи измерений. Если для проектирования серии АО 2 применялся метод обхода узлов пространственной сетки (метод слепого поиска), то к настоящему времени предложен метод, использующий элементы динамического программирования [2], и метод случайного поиска с самообучением [3]. Никогда ранее за такой короткий отрезок времени не производилось столь бурное обновление методов. И все же следует отметить, что совершенствование методов носит однобокий характер. Если абстрагироваться от конкретных особенностей, то все предложенные методы можно свести к методу проб и ошибок, и проектирование пока производится только методом анализа. Известно, что показателем разработанности любой теории является ее способность решать поставленные задачи методом синтеза. В этом смысле теория проектирования электрических машин с поиском оптимума почти не развита. Следует ожидать, что в ближайшем будущем для проектирования электрических машин придется резко увеличить количество измерений пространства в связи с новыми задачами, стоящими перед электромашиностроением. В частности, при проектировании необходимо будет рассматривать факторы, влияющие на надежность, учитывать реальные нагрузки при эксплуатации и т. д. Может оказаться, что наиболее приемлемыми методами

поиска будут методы, основанные на синтезе, так как при решении многомерных задач нелинейного программирования методами анализа встречаются большие трудности.

Другой нерешенной проблемой является вопрос о единственности решения. Поскольку подавляющее большинство методов не позволяет оценить, является ли найденное значение оптимума глобальным, всегда остается место сомнению, что получено не лучшее решение. Вопрос о единственности решения приобретает первостепенное значение, если учесть, что выпуск многих типов электрических машин производится серийно и копейки экономии на каждой машине быстро превращаются в миллионы рублей. Из распространенных методов только два — метод обхода узлов пространственной сетки и метод Монте-Карло — позволяют дать оценку точности определения глобального экстремума: в первом случае с точностью до шага, а во втором — с определенной вероятностью. Но при относительно большом числе переменных оба метода оказываются непригодными из-за чрезмерно больших затрат машинного времени. При использовании метода обхода узлов пространственной сетки с шагами, составляющими 10% от интервала изменения переменных, необходимое количество вариантов для поиска глобального оптимума при  $k$  переменных составляет

$$N_j = 10^k.$$

Для метода Монте-Карло необходимое число вариантов определяется по формуле [1].

$$N = \frac{\ln(1-p)}{\ln(1-\Delta)},$$

где

$p$  — вероятность определения глобального оптимума;

$\Delta$  — объем  $k$ -мерного кубика, выраженный в долях от общего объема области поиска.

Если принять каждое ребро  $k$ -мерного кубика равным 0,1 от ребра общего  $k$ -мерного куба, то объем  $\Delta$  при  $k$ -переменных будет равен  $10^{-k}$ . Для удовлетворительного поиска оптимума электрических машин необходимо, по крайней мере, семь независимых переменных. Тогда требуемое число вариантов в первом случае составит

$$N = 10^7,$$

а во втором — при вероятности  $p = 0,95$

$$N = 3 \cdot 10^7.$$

Принимая во внимание, что даже на ЭЦВМ М-20 время расчета одного варианта асинхронного двигателя составляет 0,25 сек., получим общее время при  $N = 10^7$  вариантов равным примерно 700 часам. Решение подобных задач на современных ЭЦВМ вряд ли целесообразно.

О возможности наличия ряда локальных экстремумов свидетельствует пример, полученный при проектировании асинхронных двигателей. Для двухполюсного двигателя с номинальной мощностью 7,5 кВт поиск производился при шести переменных:

диаметр расточки —	$D_i$ ,
число проводников в пазу статора —	$S_p$ ,
ширина зубца статора —	$b_{z1}$ ,
ширина зубца ротора —	$b_{z2}$ ,
высота зубца статора —	$h_{z1}$ ,
высота зубца ротора —	$h_{z2}$ .

За критерий оптимума принималась сумма затрат стоимости изготовления двигателя и потерь энергии в процессе эксплуатации дви-

гателя [1]. Область допустимых значений определялась ограничениями: кратностями максимального и начального пускового моментов, кратностью пускового тока, скоростью нарастания температуры в режиме короткого замыкания и превышением температуры в обмотке статора в номинальном режиме.

Писик производился двумя методами: методом многоэтапных процессов [2] и методом Гаусса — Зейделя [4]. Блок-схемы решения представлены на рис. 1 и рис. 2. В обоих случаях шаги переменных были при-

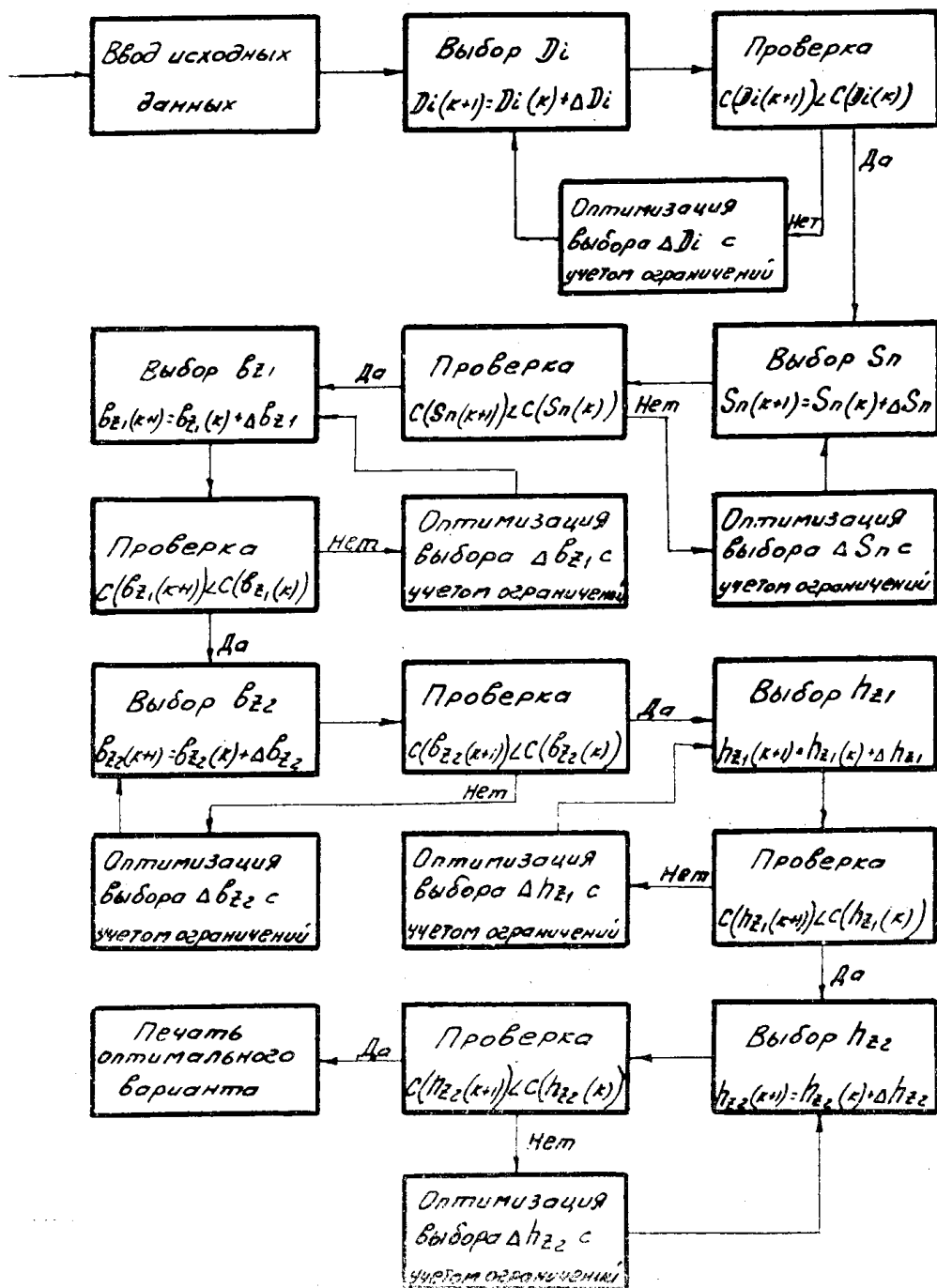


Рис. 1. Блок-схема решения методом Гаусса—Зейделя.

няты одинаковыми, т. е. область допустимых значений разбивалась одной и той же сеткой (на блок-схемах под приращением  $\Delta$  понимается обобщенный шаг, кратный единичному). Результаты решения представлены в табл. 1.

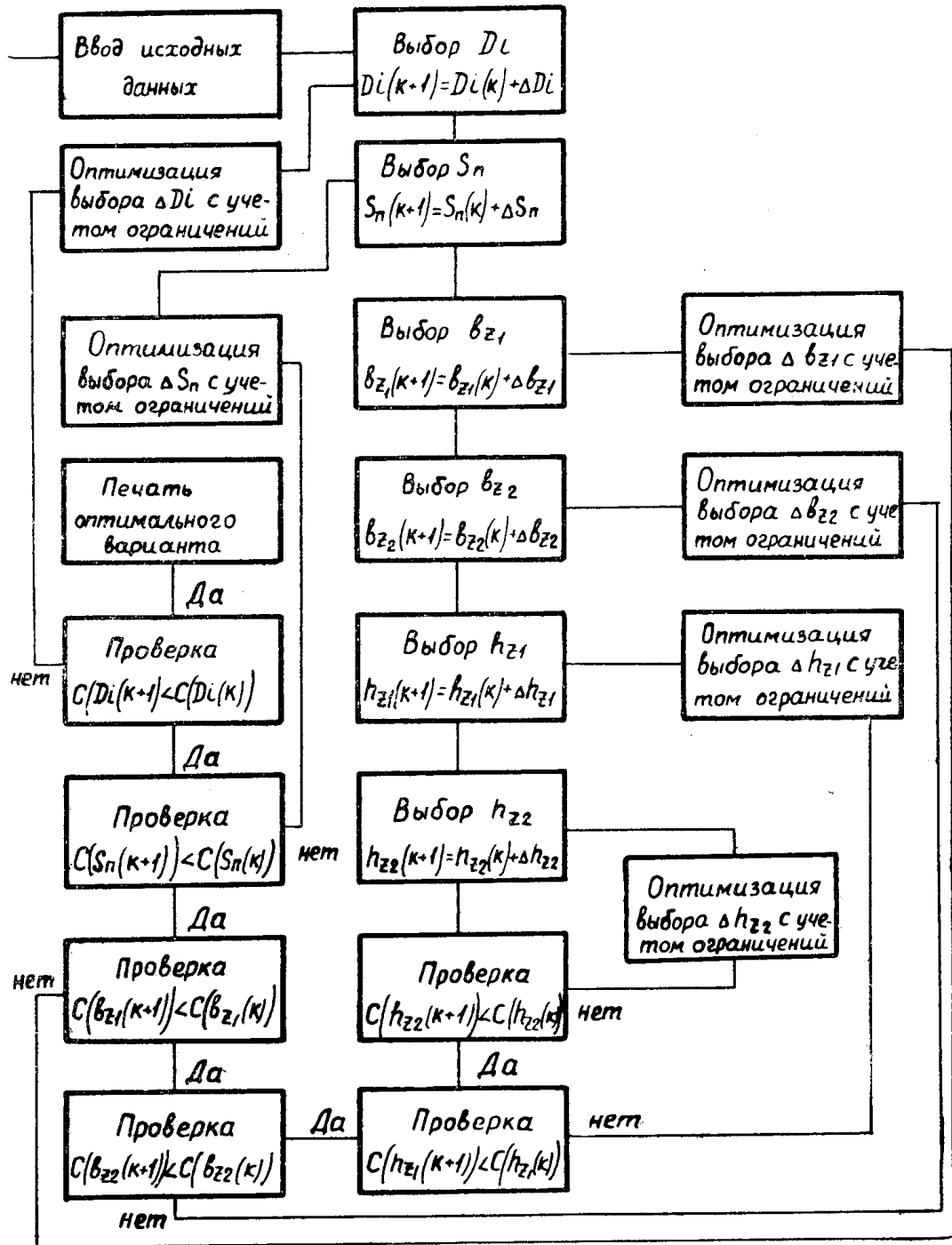


Рис. 2. Блок-схема решения методом многоэтапных процессов.

Таблица 1

Наименование	Единица измерен.	Метод многоэтапных процессов	Метод Гаусса—Зейделя
C	руб.	76,62	75,81
D <sub>i</sub>	мм	106,0	99,0
S <sub>n</sub>		26,0	26,0
b <sub>z<sub>1</sub></sub>	мм	5,10	5,40
b <sub>z<sub>2</sub></sub>	мм	6,35	5,85
h <sub>z<sub>1</sub></sub>	мм	15,95	16,70
h <sub>z<sub>2</sub></sub>	мм	25,0	22,8
τ <sub>ном</sub>	%	88,38	88,45
cosφ <sub>ном</sub>		0,92	0,92

Известно, что достаточным условием совпадения глобального и локального экстремумов являются требования выпуклости целевой функции и области допустимых значений [5]. Если (как следует из табл. 1) при одной и той же сетке различными методами получены разные величины оптимумов, то либо одно из требований, либо сразу оба требования о выпуклости нарушены. Конечно, на основе единичных примеров нельзя строить обобщения. Пока можно сделать один вывод: проблеме единственности следует уделить очень серьезное внимание.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Коган, Т. М. Тер-Микаэлян. Решение инженерных задач на цифровых вычислительных машинах, Энергия, 1964.
2. Дж. Аветисян, А. И. Бертинов. Многоэтапные процессы выбора оптимальных размеров электрических машин, Электричество, № 6, 1966.
3. Т. Г. Сорожер. Применение автоматических цифровых вычислительных машин при проектировании новых серий асинхронных двигателей, ВНИИЭМ, 1966.
4. Л. А. Растрин. Случайный поиск в задачах оптимизации многопараметрических систем, Знание, Рига, 1965.
5. С. И. Зуховицкий, Л. И. Авдеев. Линейное и выпуклое программирование, Наука, 1964.