

DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-140-155

УДК 621.363 + 06

ББК 30.2-5-05

А.В. ШЕВКУНОВА, А.В. КАШУБА

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ МАШИН

Ключевые слова: вентильно-индукторная машина, магнитная система, геометрические параметры, оптимизационный алгоритм, параметрическая оптимизация, экстремум, электромагнитный момент, пульсации.

Вопрос улучшения технико-экономических показателей вентильно-индукторных машин на стадии их проектирования имеет значительную степень актуальности. Данное исследование посвящено совершенствованию оптимизационного алгоритма проектирования электрических машин вентильно-индукторного типа.

Рассмотрению подлежала параметрическая, однокритериальная оптимизация. Задача проектирования магнитной системы вентильно-индукторной машины заключается в нахождении оптимального сочетания значений геометрических параметров, при котором значение целевой функции достигнет экстремума. В рамках данной работы оптимизация рассматривалась по критерию минимума пульсаций электромагнитного момента при малых скоростях вращения.

В качестве основы для внесения изменений с целью повышения эффективности работы оптимизационного алгоритма был взят стохастический метод – метод Монте-Карло. Суть изменений заключается в применении нормального распределения случайной величины с уменьшающей дисперсией и варьируемым значением математического ожидания вместо использования равномерного распределения.

Для данного исследования применялись методы математического моделирования, а именно метод Монте-Карло и методы теории вероятности. Расчеты магнитного поля вентильно-индукторной машины производились посредством программы FEMM 4.2, основанной на методе конечных элементов.

Благодаря внесенным изменениям в базовый алгоритм оптимизации эффективность такого критерия, как время достижения конечного результата при заданной точности расчета, стала выше. Полученные данные могут оказаться полезными при разработке технологии изготовления объекта оптимизации.

Введение. В современном мире уровень развития промышленного комплекса находится в прямой зависимости от развития электромеханических преобразователей (ЭМП). Без электрических машин, в частности электродвигателей, невозможно представить работу практически ни одной отрасли промышленности. Именно поэтому требования к их технико-экономическим показателям постоянно возрастают. Среди наиболее перспективных типов ЭМП можно выделить вентильно-индукторную электрическую машину (ВИМ), которая может эксплуатироваться как в двигательном (ВИД), так и генераторном (ВИГ) режимах. Достоинства и недостатки ВИМ к настоящему времени стали хорошо известны. Преимущества обусловлены простотой конструкции самой индукторной машины, высокими удельными показателями, большим сроком службы, надежностью, способностью работать в тяжелых условиях эксплуатации, а также широкими регулировочными возможностями. Анализируя достаточно большое количество отечественных и зарубежных научных трудов, можно сделать вывод, что перспективность электро-

приводов на их основе уже признана специалистами для многих отраслей промышленности, в наземном транспорте, быту и т.д. [2, 3, 6, 7, 12, 15, 16]. Такому развитию ВИМ способствовали как достижения силовой и информационной электроники, так и значительный прогресс в теории и практике их анализа и синтеза.

Однако, несмотря на неоспоримые достоинства данного типа ЭМП, есть и недостатки, которые не дают увеличить его конкурентоспособность. Ввиду ряда особенностей работы ВИМ [4, 8, 11, 13, 14] имеются пробелы в методах проектирования, которые являются основой для создания высокоэффективного ЭМП. Дальнейшее совершенствование ЭПМ вентильно-индукторного типа предполагает развитие методик проектирования, основанных на оптимизационных алгоритмах проектирования и специализированном программном обеспечении.

Постановка задачи. Как известно, суть оптимизационного процесса заключается в нахождении экстремума целевой функции на множествах конечномерного пространства. В рамках данного исследования рассмотрению подлежала параметрическая оптимизация. Значение целевой функции в данном случае определяется различным сочетанием оптимизируемых параметров. Математическое выражение целевой функции (C) для параметрической оптимизации в общем виде может быть представлено выражением

$$C = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где x_n – значение n -го оптимизируемого параметра; n – количество измерений многомерного пространства.

Как видно из формулы (1) и ее экспликации, значение целевой функции может быть безразмерной величиной, а также выражаться в различных единицах измерения в зависимости от оптимизируемых параметров, которые, в свою очередь, также могут иметь разные единицы измерения.

Задача оптимизации при проектировании магнитной системы ВИМ заключается в нахождении оптимального сочетания значений геометрических параметров, при котором значение целевой функции достигнет экстремума.

Для возможности определения значений целевой функции и сравнения их друг с другом необходимо задать целевую функцию с помощью конкретного математического выражения. Для этого необходимо дать физическую трактовку критерия оптимизации, на основании которой формируется математическая запись целевой функции.

Выбор критерия оптимизации должен быть направлен на улучшение одной или нескольких характеристик ВИМ. В данной работе оптимизация проводилась по критерию минимума пульсаций электромагнитного момента при малых скоростях вращения или при пуске двигателя. Например, плавный пуск ВИМ в составе тягового привода электрического подвижного состава (ЭПС) имеет важное значение для надежности работы привода в целом. Дополнительным условием при этом будет являться обеспечение максимально возможной мощности машины. Таким образом, необходимо сгладить кривую зависимости момента от положения ротора (рис. 1) двигателя при работе

в стартовом режиме так, чтобы сила тяги, создаваемая каждым двигателем, не зависела от положения ротора и была как можно больше. Применительно к ЭПС выполнение данного условия позволит уменьшить риск срыва в боксование обмоторенных колесных пар при обеспечении требуемой мощности электропоезда. Решение подобной задачи может оказаться актуальным не только для подвижного состава железнодорожного транспорта, но и для ряда общепромышленных электроприводов [9]. Хорошие результаты по снижению пульсаций момента дают средства управления, реализуемые с помощью полупроводникового преобразователя с микропроцессорной системой управления. Положительный результат можно улучшить, если на стадии проектирования в самой конструкции активной части ВИМ предусмотреть изменения, снижающие пульсации момента [5, 10, 17].

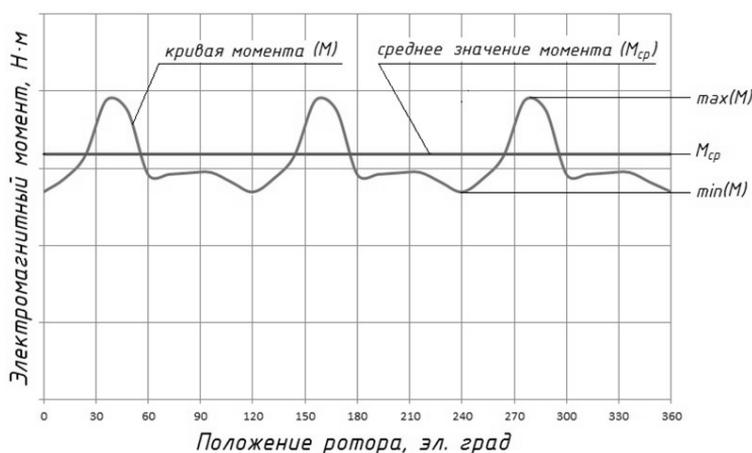


Рис. 1. Общий вид зависимости электромагнитного момента ВИМ от положения ротора

Пульсации момента двигателя весьма затруднительно представить аналитически с помощью оптимизируемых параметров машины. Полученное выражение весьма громоздко и будет состоять из множества эмпирических коэффициентов, значения которых возможно узнать только после получения достаточного количества статистических данных. Именно поэтому значение целевой функции наиболее рационально представить через выходные характеристики машины, значения которых будут получены посредством компьютерного моделирования с учетом всех значений оптимизируемых параметров.

Для сглаживания кривой момента необходимо уменьшать разницу между максимальным и минимальным значениями момента (M_3) за полный цикл работы магнитной системы (360 эл. град.)

$$Ц = \max(M_3(\Theta)) - \min(M_3(\Theta)) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $\max(M_3(\Theta))$ – максимальное значение электромагнитного момента за полный цикл работы магнитной системы, Н·м; $\min(M_3(\Theta))$ – минимальное значение электромагнитного момента за полный цикл работы магнитной системы, Н·м.

Однако при таком задании целевой функции результат оптимизации может оказаться неприемлемым: при уменьшении значения среднего электромагнитного момента будет уменьшаться и абсолютная разница между максимальным и минимальным его значениями. Данное обстоятельство может стать причиной снижения мощности машины, что противоречит поставленному условию. Поэтому выражение (2) необходимо представить таким образом, чтобы сглаживание кривой момента происходило одновременно с увеличением числового значения момента:

$$\Pi = \frac{\max(M_{\Theta}(\Theta)) - \min(M_{\Theta}(\Theta))}{M_{\text{ср}}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $M_{\text{ср}}$ – среднее значение электромагнитного момента ВИМ, Н·м.

Исходя из свойства дробей, можно сделать следующие выводы:

а) при уменьшении разницы между максимальным и минимальным значениями момента за полный цикл работы магнитной системы уменьшается значение целевой функции;

б) при увеличении значения среднего электромагнитного момента ВИМ уменьшается значение целевой функции.

Таким образом, заданные условия (снижение пульсаций момента двигателя и обеспечение максимально возможной мощности) будут выполнены. Следует отметить, что целевую функцию по критерию минимума пульсаций момента можно задать и другими способами. Например, вместо числителя в формуле (3) использовать не абсолютную разницу между максимальным и минимальным значениями момента, а среднеквадратичное отклонение кривой момента от его среднего значения. Однако данный способ не позволяет учесть негативное влияние «острых пиков» кривой момента на пульсацию ВИМ.

Последнее обстоятельство применительно, например, к электропоездам, безусловно, создаст негативные факторы, которые будут ухудшать условия трогания и разгона. Поскольку велика вероятность того, что ротор двигателя хотя бы одной из двадцати обмоточных осей в момент трогания будет находиться в положении, соответствующем высокому значению момента.

Разработка алгоритма оптимизации. Развитие мощностей ЭВМ способствовало непрерывному совершенствованию математических методов решения оптимизационных задач. На сегодняшний день существует множество различных методов оптимизации [2], которые адаптированы под конкретные цели.

На основе практического опыта создания ЭМП вентильно-индукторного типа посредством оптимизационных алгоритмов можно сделать вывод, что достаточно качественные результаты можно получить благодаря использованию методов Монте-Карло и Нелдера – Мида (деформируемого многогранника). Каждому из них присущи определенные преимущества и недостатки.

С целью достижения максимального уровня технико-экономических показателей ВИМ был разработан алгоритм оптимизации, обладающий главными критериями: сходимостью при поиске глобального экстремума целевой функции итерационного алгоритма, минимальным временем достижения ко-

нечного результата при заданной точности расчета. В качестве базисного алгоритма был использован метод Монте-Карло, удовлетворяющий условиям достижения поставленной цели в рамках настоящего исследования.

Суть метода Монте-Карло заключается в том, что производится генерация случайных чисел с равномерным распределением в заданных ограничениях значений параметров и в дальнейшем выборе наилучшего их сочетания из всей серии вбросов. Гораздо эффективнее производить случайные вбросы с такой плотностью вероятности, которая бы гарантировала большое количество вычислений целевой функции в окрестности заранее известного или предполагаемого экстремума. Поскольку заведомо неизвестно расположение экстремума целевой функции, возникает необходимость предоставления примерных координат его расположения с целью увеличения в данной окрестности плотности вероятности случайных вбросов значений параметров.

Для выполнения вышеописанной задачи необходимо совершить некоторое количество случайных вбросов с равномерной плотностью распределения случайной величины во всем многомерном пространстве. Далее лучшая точка из полученных будет считаться квазиэкстремумом, координаты которого следует уточнить. Следующим шагом будет переход к использованию случайной величины с нормальным распределением, имеющим математическое ожидание в точке квазиэкстремума и большую дисперсию. После каждого вычисления целевой функции за квазиэкстремум принимаем последнюю точку (при достижении значения целевой функции, лучшего из полученных ранее), корректируя математическое ожидание и уменьшая дисперсию (рис. 2).

Представленный рис. 2 служит примером для случая, если бы ограничения для варьирования оптимизируемым параметром были от 0 до 1 и экстремум был бы расположен в точке с координатами 0,55 для данного параметра.

По завершении отведенных вычислений целевой функции последний квазиэкстремум принимается за результат оптимизации.

Для повышения эффективности описанного алгоритма необходимо правильно определить закон «сужения» плотности вероятности к экстремуму. Для эффективного восприятия графического предоставления данной зависимости введено понятие «точность попадания в экстремум». В настоящей работе эта величина обозначена символом « T » и имеет следующую взаимосвязь с дисперсией:

$$T = \frac{1}{\sigma^2}. \quad (4)$$

Для упрощения алгоритма оптимизации зависимость T от номера вычисления целевой функции представим аналитически с помощью гладкой функции, общий вид которой

$$T = f(n), \quad (5)$$

где n – номер вычисления целевой функции.

Как было сказано ранее, вначале необходимо выполнить некоторое количество случайных вбросов во всем многомерном пространстве с равномерной плотностью распределения ($T = 0$) случайной величины или близкой к

равномерной ($T \rightarrow 0$). Данное условие позволит ознакомиться с «поведением» целевой функции во всем рассматриваемом пространстве. Далее произойдет самоадаптация плотности вероятности к экстремуму целевой функции. Наиболее адаптированная для этих условий графическая интерпретация зависимости имеет вид, изображенный на рис. 3 (значения n и T представлены в относительных единицах).

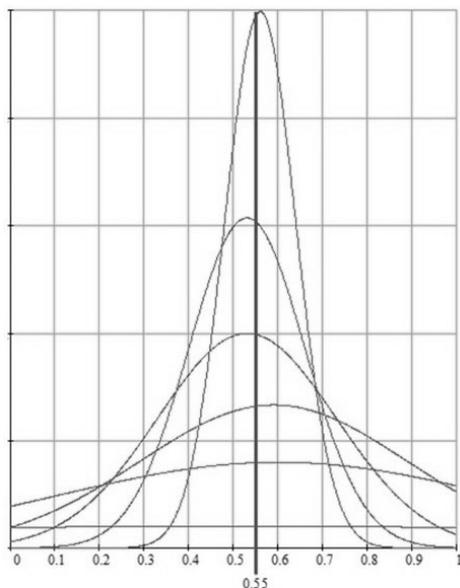


Рис. 2. Демонстрация семейства графиков плотностей вероятности, сходящихся к экстремуму

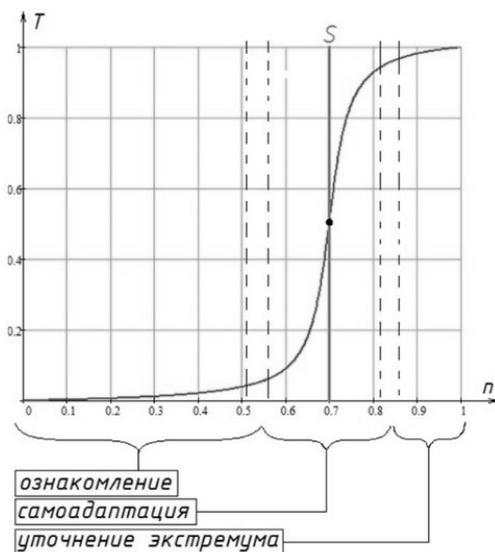


Рис. 3. Зависимость величины «точность попадания в экстремум» от номера вычисления целевой функции

Аналитическое выражение, соответствующее закону самоадаптации, изображенному на рис. 4, имеет вид

$$T(n) = \frac{\operatorname{arctg}(w \cdot n - w \cdot S) + \operatorname{arctg}(w \cdot S)}{\operatorname{arctg}(w - w \cdot S) + \operatorname{arctg}(w \cdot S)}, \quad (6)$$

где w – коэффициент длительности самоадаптации (рис. 4, *а*); S – коэффициент времени наступления самоадаптации с момента начала оптимизации (рис. 4, *б*).

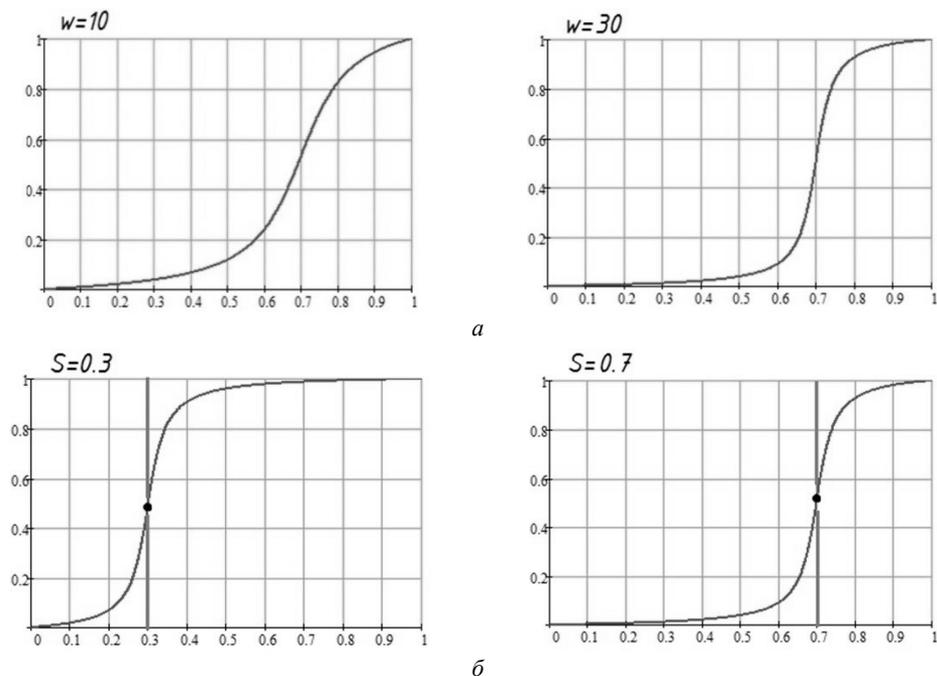


Рис. 4. Изменение коэффициента длительности самоадаптации (*а*) и коэффициента времени наступления самоадаптации с момента начала оптимизации (*б*)

При многократном проведении оптимизаций различных целевых функций, заданных аналитически с множеством экстремумов, было получено следующее заключение: наибольшая точность оптимизации и вероятность нахождения глобального экстремума данным методом достигаются в случае, если коэффициенты S и w будут равны 0,7 и 30, а максимальное значение T при этом будет составлять 10^4 . Закон самоадаптации, соответствующий данным значениям коэффициентов, представлен на правых рис. 4, *а* и *б*.

После нахождения рационального сочетания коэффициентов S и w были проанализированы статистические данные, характеризующие зависимость вероятности нахождения глобального экстремума от количества отведенных для оптимизации вычислений целевой функции (таблица). При задании целевой функции моделировались два экстремума каждый раз различной пологости и в различных областях двухмерного пространства.

Статистические данные по нахождению глобального экстремума целевой функции, заданной аналитически

Количество вычислений целевой функции	Вероятность нахождения глобального экстремума (P)	Вероятность принятия за результат оптимизации локального экстремума ($1 - P$)
100	0,71	0,29
200	0,80	0,20
300	0,85	0,15

Как видно из таблицы, при увеличении количества отведенных вычислений целевой функции риск принятия за результат оптимизации локального экстремума снижается нелинейно. Причем характер снижения этого риска такой, что если вместо одной оптимизации, ограниченной 300 вычислениями целевой функции, трижды независимо друг от друга провести оптимизацию, ограниченную 100 вычислениями целевой функции, то итоговый риск принятия за результат оптимизации локального экстремума будет существенно меньше. В качестве доказательства данного утверждения ниже приведены расчеты, наглядно демонстрирующие целесообразность выполнения оптимизации в несколько независимых друг от друга попыток.

Риск принятия за результат оптимизации локального экстремума целевой функции вместо глобального определяется по формуле

$$\bar{P}_1 = (1 - P_1). \quad (7)$$

Индекс 1 указывает на однократную проведенную оптимизацию.

Итоговый риск принятия за результат оптимизации локального экстремума для трех независимых друг от друга оптимизаций определяется по формуле

$$\bar{P}_3 = (1 - P_1^3). \quad (8)$$

Индекс 3 указывает на то, что проводилось три попытки оптимизации, независимых друг от друга.

Подставив статистические данные из ранее представленной таблицы в формулу (7), получим значение риска принятия за результат оптимизации локального экстремума для однократной оптимизации, ограниченной 300 вычислениями целевой функции:

$${}_{300}\bar{P}_1 = 0,15.$$

Подставив статистические данные из таблицы в формулу (8), получим значение риска принятия за результат оптимизации локального экстремума для трехкратной оптимизации, ограниченной 100 вычислениями целевой функции:

$${}_{100}\bar{P}_3 = 0,29^3 = 0,024.$$

Как видно из представленных расчетов, «дробление оптимизации» на несколько попыток (меньших по количеству вычислений целевой функции) существенно повышает вероятность нахождения глобального экстремума. Следует отметить, что слишком малое количество вычислений целевой функции в одной попытке уменьшает точность результата.

Аналогичные виртуальные эксперименты по оптимизации целевых функций, проведенные в многомерных пространствах, с несколькими экстремумами подтвердили вышеописанные расчеты. Данное обстоятельство

дает гарантию целесообразности такого математического приема, как «дробление оптимизации» на несколько независимых попыток.

Однако в случаях с большим количеством экстремумов и с большим «дроблением» существует большая вероятность неоднократного нахождения одного и того же локального экстремума. С целью уменьшения этого нежелательного эффекта в разработанный алгоритм внесены дополнительные условия, существенно снижающие данный момент. Для этого во второй и последующих попытках нахождения экстремума в плотности вероятности добавлены «слепые зоны», которые в окрестности ранее полученных экстремумов уменьшают плотность вероятности случайной величины (рис. 5, а).

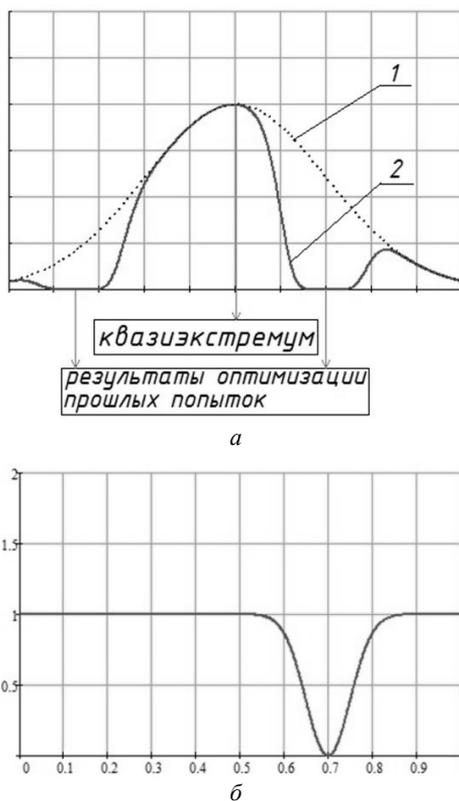


Рис. 5. Пример «слепых зон» в плотности вероятности случайной величины для одномерного пространства (а) и преобразованная кривая закона нормального распределения (б)

Кривая 1 описывает плотность вероятности нормального распределения, аналитическое выражение которого имеет вид

$$f(x) = \frac{\exp\left(\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \quad (9)$$

где μ – математическое ожидание случайной величины; σ – среднеквадратическое отклонение.

Для внесения в плотность вероятности, заданной по кривой 1 (рис. 5, а), «слепой зоны» необходимо выражение формулы (9) умножить на выражение, соответствующее кривой 2.

В качестве базы для аппроксимации данной зависимости был взят также закон нормального распределения, но преобразованный до вида, показанного на рис. 5, б.

Аналитическое выражение преобразованного таким образом закона нормального распределения имеет следующий вид:

$$f(x) = 1 - \exp\left(\frac{-(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (10)$$

Значения μ и σ для построения графика, изображенного на рис. 5, б, равны соответственно 0,7 и 0,05 (при условии задания ограничений в относительных единицах).

Очевидно, что «слепая зона», заданная по формуле (10), недостаточно широка. Данное обстоятельство может привести к повторному приближению к уже известному экстремуму. Для увеличения «слепой зоны» необходимо выражение (10) возвести в положительную степень. Таким образом, аппроксимация графика 2 (рис. 5, а) будет производиться с помощью следующего аналитического выражения:

$$f(x) = \left(1 - \exp\left(\frac{-(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)\right)^b, \quad (11)$$

где b – показатель ширины «слепой зоны» (рис. 6).

Как видно из рис. 6, а, ширина «слепой зоны» нелинейно зависит от показателя b . При выполнении такой оптимизации на ЭВМ возведение чисел в высокие степени могут повлечь за собой замедление работы алгоритма. Поэтому «слепую зону» не следует задавать слишком широкой, используя предложенную аппроксимацию. В добавление к этому в слишком широкой вновь созданной «слепой зоне» может оказаться еще не найденный экстремум, который уже ни в какой последующей попытке найден так и не будет.

При многократном проведении оптимизаций в многомерном пространстве различных целевых функций, заданных аналитически с множеством экстремумов и с использованием «слепых зон», было принято следующее решение: показатель b должен быть равен 3, при этом среднеквадратичное отклонение σ должно быть равно 0,1. Данные значения наиболее рациональны как с точки зрения скорости генерации случайных чисел с заданной плотностью вероятности, так и с точки зрения возможности попадания в «слепую зону» соседнего еще не найденного экстремума.

Как было сказано ранее, большое «дробление оптимизации» увеличивает вероятность нахождения глобального экстремума, при этом точность вычисления снижается. Поэтому наиболее целесообразно в заключительной части оптимизации применить закон самоадаптации, графическая интерпретация которого изображена на рис. 6, б.

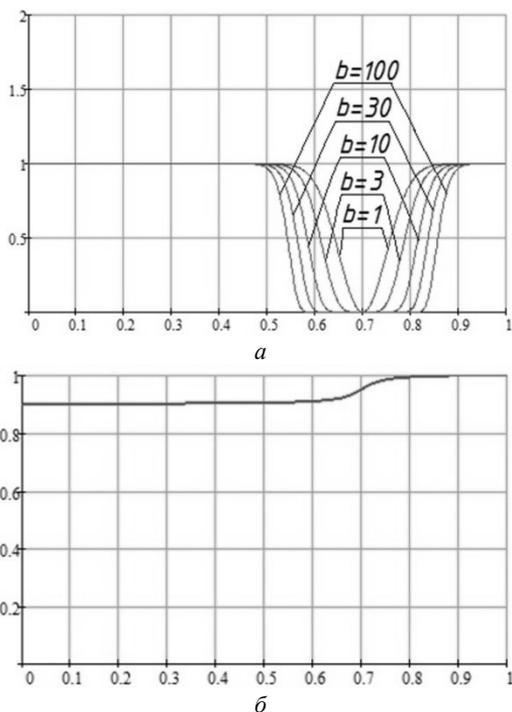


Рис. 6. Влияние показателя b на ширину «слепой зоны» (а) и закон самоадаптации для заключительной части оптимизации (б)

Математическое ожидание для плотности вероятности при первом вычислении целевой функции в заключительной части оптимизации следует устанавливать в соответствии с лучшим из всех полученных ранее экстремумов. Применение «слепых зон» при таких условиях вовсе не обязательно, так как в последней попытке происходит не отыскание нового экстремума, а уточнение лучшего.

Результаты исследования. Для демонстрации разработанного алгоритма был рассмотрен пример оптимизации в программе MatLab конкретной целевой функции (минимум пульсаций M_3) в трехмерном пространстве, заданной аналитически с помощью выражения

$$\begin{aligned}
 Ц(a_1, a_2, a_3) = & \frac{2}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} + \frac{1}{(a_1 - 2)^2 + (a_2 - 3)^2 + (a_3 - 4)^2} + \\
 & + \frac{1,5}{(a_1 - 9,9)^2 + (a_2 - 9)^2 + (a_3 - 6)^2 + 1}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

где a_n – n -й оптимизируемый параметр.

Такая целевая функция имеет три экстремума, координаты которых выделены вертикальной пунктирной линией на рис. 7. Цифрой 1 обозначен глобальный экстремум в заданных ограничениях, а цифрами 2 и 3 – два локальных. На рис. 7 изображено по три графика, которые показывают зависимость

целевой функции от каждого оптимизируемого параметра. Целевая функция на этих рисунках изображена в виде набора точек, указывающих значение параметра и соответствующего ему значение целевой функции.

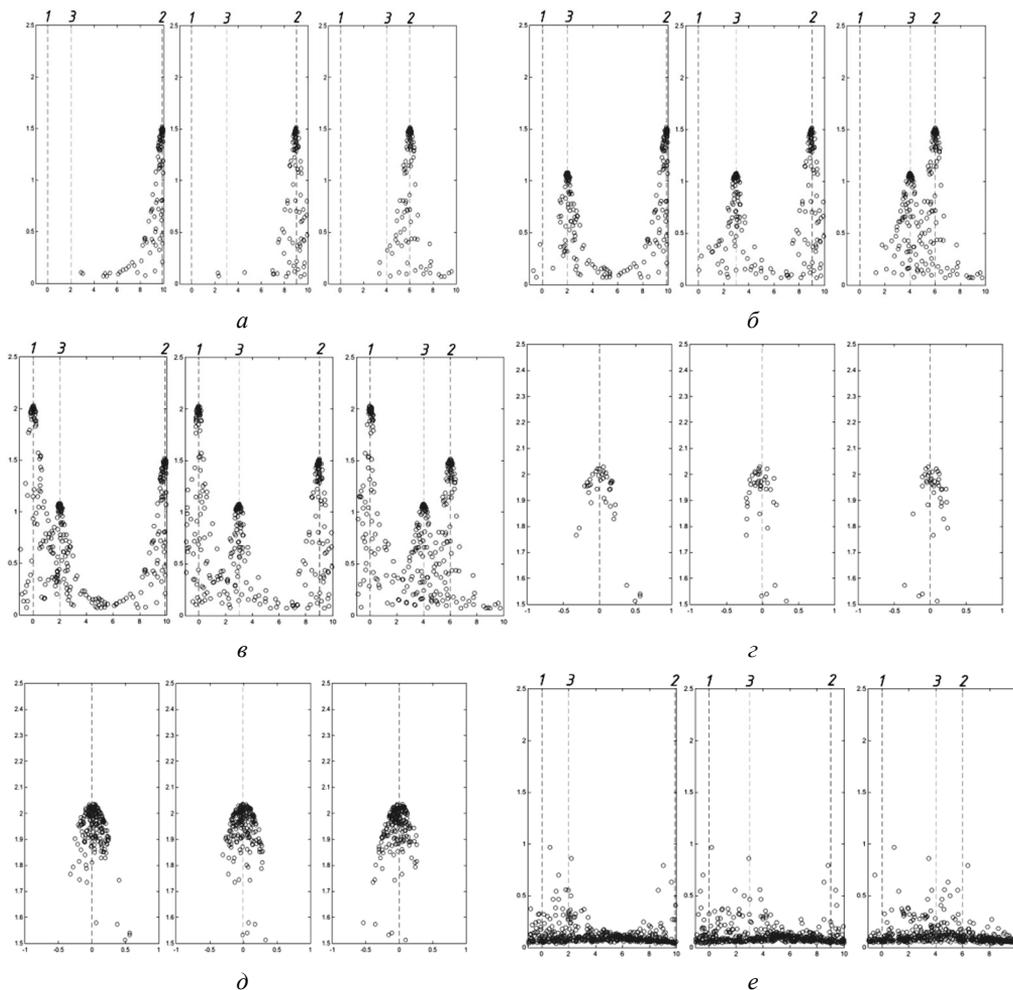


Рис. 7. Нахождение глобального экстремума:
 а – результаты первой попытки; б – результаты первой и второй попыток;
 в – результаты трех попыток; г – скопление точек в окрестности лучшего из трех найденных экстремумов до его уточнения; д – скопление точек в окрестности лучшего из трех найденных экстремумов после его уточнения;
 е – визуализация целевой функции в виде набора точек при использовании метода Монте-Карло

В данном примере применена следующая формула «дробления оптимизации»: $3 \cdot 100 + 150$. Это означает, что оптимизация проводится в 3 попытки, каждая из которых ограничена 100 вычислениями целевой функции, а в заключительной части лучший экстремум уточняется за 150 вычислений.

Как видно из рис. 7, а, при первой попытке за 100 вычислений удалось найти лишь локальный экстремум. Вторая и третья попытки отыскания экстремума с учетом «слепых зон» изображены на рис. 7, б и в.

На рис. 7, г и д изображены результаты заключительной части оптимизации – уточнения лучшего экстремума из трех найденных.

Для сравнения разработанного метода оптимизации с взятым за основу методом Монте-Карло на рис. 7, е приведена визуализация целевой функции, значения которой получены с использованием только равномерного распределения случайной величины при том же отведенном количестве вычислений целевой функции (450).

При сравнении рис. 7, а – д с рис. 7, е преимущества предложенного алгоритма очевидны. За равный промежуток времени были получены качественно разные результаты.

Выводы. По итогам проведенного исследования можно сформулировать следующие основные положения предложенного алгоритма оптимизации:

а) за основу разработанного алгоритма был взят метод случайных чисел Монте-Карло;

б) была применена не равномерная плотность вероятности, а имеющая нормальное распределение случайной величины;

в) в алгоритме происходит самоадаптация процесса поиска экстремума за счет корректировки математического ожидания нормального распределения случайной величины и уменьшения дисперсии;

г) применено «дробление оптимизации» на несколько менее точных попыток, что увеличивает шанс отыскания глобального экстремума не за счет качества его поиска, а за счет количества попыток;

д) применены «слепые зоны» в отыскании экстремумов, которые не позволяют дважды находить один и тот же экстремум;

е) в заключительной части оптимизации происходит уточнение лучшего экстремума, что позволяет «дробить оптимизацию» на большое количество попыток при сохранении высокой точности результата.

Разработанный алгоритм оптимизации позволяет точно (с погрешностью до 5% относительно заданных ограничений) находить экстремумы целевой функции. Указанная точность часто является достаточной для решения ряда практических задач, что подчеркивает состоятельность и целесообразность использования предложенного алгоритма.

К тому же при точном нахождении нескольких экстремумов появляется возможность оценки их пологости и «остроты» с помощью специальных алгоритмов. Эти данные могут оказаться полезными при разработке технологии изготовления объекта оптимизации. Например, в случае изготовления технического устройства с сочетанием параметров, соответствующих пологому экстремуму, появляется возможность применить менее точное оборудование, что, безусловно, снизит себестоимость единицы данной продукции.

Литература

1. Баль В.Б., Минт Т.А. Проектирование и выбор параметров вентильно-индукторного генератора // Электричество. 2019. № 11. С. 40–44.

2. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.

3. Буряковский С.Г., Любарский Б.Г., Маслий Ар.С., Маслий Ан.С., Шевкунова А.В. Оптимизация системы управления вентильно-индукторного двигателя для стрелочного перевода // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2013. № 2. С. 61–67.
4. Гребенников Н.В. Математическая модель для анализа электромагнитных процессов в реактивных индукторных машинах с сильным взаимным влиянием фаз // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. № 2. С. 315–321.
5. Кашуба А.В. Оптимизационный метод формирования геометрических размеров зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя // Транспортные системы и технологии. 2020. № 1. С. 30–47.
6. Мирошниченко Е.Е. Повышение надежности подшипникового узла тягового двигателя вентильно-индукторного типа для транспортных систем // Кронос. 2021. № 4(54). С. 29–32.
7. Однокопылов Г.И., Букреев В.Г., Розаев И.А. Исследование отказоустойчивого вентильно-индукторного электродвигателя насоса для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. № 10. С. 69–81.
8. Пахомин С.А. Влияние геометрии зубцового слоя и параметров питания на показатели вентильного реактивного индукторного двигателя // Известия вузов. Электромеханика. 2000. № 1. С. 30–36.
9. Петрушин А.Д., Кашуба А.В. Оптимизация активной части вентильно-индукторного двигателя // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2016. № 1(61). С. 61–65.
10. Петрушин А.Д., Кашуба А.В. Оптимизация вентильно-индукторных электрических машин с учетом динамических режимов // СТИН. 2018. № 3. С. 7–9.
11. Петрушин А.Д., Шевкунова А.В., Смачный В.Ю. Исследование взаимосвязи электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя и геометрических элементов его магнитной системы // Вестник Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2020. № 2. С. 127–137.
12. Птах Г.К., Темирев А.П., Звездунов В.А., Цветков А.А. Опыт разработки и перспективы применения вентильно-индукторных электроприводов на военно-морском флоте России // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 6. С. 32–37.
13. Пуйло Г.В., Порайко А.С., Радимов И.Н., Рышиа В.В. Влияние геометрических соотношений зубцовой зоны на электромагнитный момент вентильно-реактивного двигателя // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2003. № 485. С. 112–117.
14. Смачный В.Ю., Шевкунова А.В., Шутемов С.В. Схема питания фазы вентильно-индукторного двигателя с одним силовым ключом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 30. С. 102–118.
15. Kocan S., Rafajdus P. Dynamic model of High Speed Switched Reluctance Motor for automotive applications. *Transportation Research Procedia*, 2019, vol. 40, pp. 302–309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.045> (Access Date: 2021, July 2).
16. Omac Z., Cevahir C. Control of switched reluctance generator in wind power system application for variable speeds. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.01.009> (Access Date: 2021, July 2).
17. Petrushin A.D., Kashuba A.V. Dynamic optimization of switched-reluctance motors. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 9, pp. 705–706.

ШЕВКУНОВА АНАСТАСИЯ ВЛАДИМИРОВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры тягового подвижного состава, Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, Ростов-на-Дону (nastya3051990@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5508-8367>).

КАШУБА АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ – инженер 1-й категории, кафедра безопасности жизнедеятельности, Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, Ростов-на-Дону (kashuba-av@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6529-1895>).

Anastasiya V. SHEVKUNOVA, Alexandr V. KASHUBA

IMPROVEMENT OF THE DESIGN ALGORITHM
OF SWITCHED-RELUCTANCE MACHINES

Key words: switched-reluctance machine, magnetic system, geometric parameters, optimization algorithm, parametric optimization, extremum, electromagnetic moment, pulsations.

The issue of improving the technical and economic indicators of switched-reluctance machines at the stage of their design has a significant degree of relevance. This study is devoted to improving the optimization algorithm for designing electric machines of the valve-inductor type.

Parametric, single-criteria optimization was subject to consideration. The task of designing a magnetic system of a switched-reluctance machine is to find the optimal combination of values of geometric parameters, at which the value of the objective function reaches an extremum. Within the framework of this work, optimization was considered by the criterion of the minimum pulsations of the electromagnetic moment at low rotational speeds.

The stochastic method – the Monte-Carlo method – was used as the basis for making changes to improve the efficiency of the optimization algorithm. The essence of the changes is to apply a normal distribution of a random variable with decreasing variance and with a variable value of the mathematical expectation instead of using a uniform distribution.

For this study, methods of mathematical modeling were used, namely the Monte-Carlo method and methods of probability theory. Calculations of the magnetic field of the switched-reluctance machine were performed using the FEMM 4.2 program based on the finite element method.

Due to the changes made to the basic optimization algorithm, the effectiveness of such a criterion as the time to achieve the final result with a given calculation accuracy has become higher. The obtained data can be practically useful in the development of manufacturing technology for the object of optimization.

References

1. Bal' V.B., Mint T.A. *Proektirovanie i vybor parametrov ventil'no-induktornogo generatora* [Design and selection of parameters of a switched-reluctance generator]. *Elektrichestvo*, 2019, no. 11, pp. 40–44.
2. Bunday B. *Basic Optimisation Methods*. Edward Arnold, 1984, 136 p. (Russ. ed.: *Metody optimizatsii. Vvodnyy kurs*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1988, 128 p.).
3. Buryakovskiy S.G., Lyubarskiy B.G., Masliy Ar.S., Masliy An.S., Shevkunova A.V. *Optimizatsiya sistemy upravleniya ventil'no-induktornogo dvigatelya dlya strelochnogo perevoda* [Optimization of the control system of the switched-reluctance motor for the switch]. *Vestnik Rostovskogo universiteta putei soobshcheniya*, 2013, no. 2, pp. 61–67.
4. Grebennikov N.V. *Matematicheskaya model' dlya analiza elektromagnitnykh protsessov v reaktivnykh induktornykh mashinakh s sil'nym vzaimnym vliyaniem faz* [A mathematical model for the analysis of electromagnetic processes in reactive inductor machines with a strong mutual influence of phases]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya*, 2019, no. 2, pp. 315–321.
5. Kashuba A.V. *Optimizatsionnyi metod formirovaniya geometricheskikh razmerov zubtsovoi zony ventil'no-induktornogo dvigatelya* [Optimization method for forming the geometric dimensions of the tooth zone of a switched-reluctance motor]. *Transportnye sistemy i tekhnologii*, 2020, no. 1, pp. 30–47.
6. Miroshnichenko E.E. *Povyshenie nadezhnosti podshipnikovogo uzla tyagovogo dvigatelya ventil'no-induktornogo tipa dlya transportnykh sistem* [Improving the reliability of the bearing unit of the traction motor of the switched-reluctance type for transport systems]. *Kronos*, 2021, no. 4(54), pp. 29–32.
7. Odnokopylov G.I., Bukreyev V.G., Rozayev I.A. *Issledovanie otkazoustoichivogo ventil'no-induktornogo elektrodvigatelya nasosa dlya dobychi nefi* [Investigation of a fault-tolerant switched-reluctance electric motor of a pump for oil production]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2019, no. 10, pp. 69–81.
8. Pakhomin S.A. *Vliyanie geometrii zubtsovogo sloya i parametrov pitaniya na pokazateli ventil'nogo reak-tivnogo induktornogo dvigatelya* [The influence of the geometry of the tooth layer and

the power supply parameters on the performance of a venous reactive inductor motor]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2000, no. 1, pp. 30–36.

9. Petrushin A.D., Kashuba A.V. *Optimizatsiya aktivnoi chasti ventil'no-induktornogo dvigatelya* [Optimization of the active part of the switched-reluctance motor]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, 2016, no. 1 (61), pp. 61–65.

10. Petrushin A.D., Kashuba A.V. *Optimizatsiya ventil'no-induktornykh elektricheskikh mashin s uchetom dinamicheskikh rezhimov* [Optimization of switched-reluctance electric machines taking into account dynamic modes]. *STIN*, 2018, no. 3, pp. 7–9.

11. Petrushin A.D., Shevkunova A.V., Smachnyy V.YU. *Issledovanie vzaimosvyazi elektromagnitnogo momenta ventil'no-induktornogo dvigatelya i geometricheskikh elementov ego magnitnoi sistemy* [Investigation of the relationship between the electromagnetic moment of a switched-reluctance motor and the geometric elements of its magnetic system]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*, 2020, no. 2, pp. 127–137.

12. Ptakh G.K., Temirev A.P., Zvezdunov V.A., Tsvetkov A.A. *Opyt razrabotki i perspektivy primeneniya ventil'no-induktornykh elektroprivodov na voenno-morskoy flote Rossii* [Experience in the development and prospects for the use of switched-reluctance electric drives in the Russian Navy]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2014, no. 6, pp. 32–37.

13. Puylo G.V., Porayko A.S., Radimov I.N., Rymsha V.V. *Vliyanie geometricheskikh sootnoshenii zubtsovoi zony na elektromagnitnyy moment ventil'no-reaktivnogo dvigatelya* [Influence of geometric ratios of the tooth zone on the electromagnetic moment of a switched-jet engine]. *Visnik Natsional'nogo universitetu «Lvivs'ka politehnika»*, 2003, no. 485, pp. 112–117.

14. Smachnyy V.Yu., Shevkunova A.V., Shutemov S.V. *Skhema pitaniya fazy ventil'no-induktornogo dvigatelya s odnim silovym klyuchom* [Power supply circuit of the phase of a switched-reluctance motor with one power key]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*, 2019, no. 30, pp. 102–118.

15. Kocan S., Rafajidus P. Dynamic model of High Speed Switched Reluctance Motor for automotive applications. *Transportation Research Procedia*, 2019, vol. 40, pp. 302–309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.045> (Access Date: 2021, July 2).

16. Omaç Z., Cevahir C. Control of switched reluctance generator in wind power system application for variable speeds. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.01.009> (Access Date: 2021, July 2).

17. Petrushin A.D., Kashuba A.V. Dynamic optimization of switched-reluctance motors. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 9, pp. 705–706.

ANASTASIYA V. SHEVKUNOVA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Traction Rolling Stock Department, Rostov State Transport University, Russia, Rostov-on-Don (nastya3051990@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5508-8367>).

ALEXANDR V. KASHUBA – Engineer of the 1st Category, Life Safety Department, Rostov State Transport University, Russia, Rostov-on-Don (kashuba-av@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6529-1895>).

Формат цитирования: Шевкунова А.В., Кашуба А.В. Усовершенствование алгоритма проектирования вентиляльно-индукторных машин // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 3. – С. 140–155. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-140-155.