

МНОГООБЪЕКТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ «СИБИРЬ-2» С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

В. Н. Корчуганов, А. С. Смыгачева, Е. А. Фомин

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Одним из эффективных способов исследования и оптимизации нелинейных эффектов является численное моделирование. Однако моделирование сложных процессов с учетом большого количества нелинейных эффектов и использованием классических методов оптимизации сильно затруднено. В статье рассматривается применение многообъектного генетического алгоритма для оптимизации магнитооптических структур источников синхротронного излучения. Используемый алгоритм позволяет эффективно оптимизировать как линейные, так и сложные, сильно нелинейные магнитооптические структуры ускорителей с целью получения требуемых параметров.

One of the best ways to design, research and optimize accelerators and synchrotron radiation sources is to use numerical simulation. Nevertheless, very often during complex physical process simulation considering many nonlinear effects the use of classical optimization methods is difficult. The article deals with the application of multiobjective optimization using genetic algorithms for accelerators and light sources design. These algorithms allow both simple linear and complex nonlinear lattices to be efficiently optimized when obtaining the required facility parameters.

PACS: 29.20.dk; 41.75.-i; 41.85.-p

ВВЕДЕНИЕ

Процесс оптимизации магнитооптических структур источников синхротронного излучения, удовлетворяющих определенным условиям, является весьма нетривиальным. Так, при одновременной оптимизации нескольких параметров накопителя (например, минимизации эмиттанса пучка и максимизации динамической апертуры или минимизации эмиттанса пучка и коэффициента уплотнения орбит) с большим количеством варьируемых параметров и дополнительных ограничений возникают серьезные сложности. А именно, наличие большого количества локальных минимумов целевой функции приводит к длительному времени решения задачи оптимизации. Кроме того, как правило, при решении сложных задач существует большое множество решений различного качества. Поэтому поиск удовлетворительного решения превращается в искусство, а большинство существующих «быстрых и эффективных» методов оптимизации неприменимо.

Большинство задач оптимизации магнитооптических структур источников синхротронного излучения можно отнести к классу комбинаторных со множеством решений

различного качества. Для поиска лучшего решения, как правило, осуществляется перебор (направленный, случайный или комбинированный) всевозможных значений параметров задачи.

Одним из эффективных механизмов поиска удовлетворительных решений комбинаторных задач на множестве альтернатив за приемлемое время являются так называемые генетические алгоритмы. Генетические алгоритмы — эвристические алгоритмы поиска, используются для решения задач оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомым параметров с применением механизмов, напоминающих биологическую эволюцию [1].

Основные этапы работы генетических алгоритмов представлены в виде схемы, изображенной на рис. 1. Алгоритм для формирования начальной популяции может быть различным, но чаще всего используется случайный процесс с целью охватить большее разнообразие для поиска решений. Основными операторами генетических алгоритмов являются «выбор родителей» и «селекция» (отбор хромосом в новую популяцию), «кроссингвер» и «мутация». Вид операторов играет важную роль в реализации и повышении эффективности генетического алгоритма. Критерием окончания процесса может служить заданное количество поколений или сходимость популяции (такое состояние популяции, когда все особи популяции почти одинаковы и могут находиться в области некоторого экстремума). Таким образом, сходимость популяции обычно означает, что найдено лучшее или близкое к нему решение.

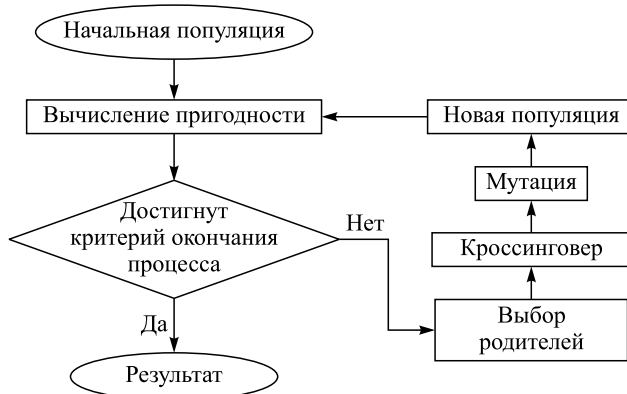


Рис. 1. Схема классического генетического алгоритма

Стоит отметить, что, как и все алгоритмы оптимизации, генетические алгоритмы имеют свои достоинства и недостатки. Так, к достоинствам можно отнести:

- отсутствие требования информации о поведении целевой функции (например, дифференцируемости и непрерывности);
- наличие разрывов целевой функции, оказывающих незначительное влияние на эффективность оптимизации;
- относительную стойкость к попаданию в локальные экстремумы.

А к недостаткам относятся:

- неэффективность применения в случае оптимизации целевых функции, требующей большого времени на вычисление;

— большое количество свободных параметров, часто превращающих «работу с генетическими алгоритмами» в «игру с генетическими алгоритмами»;

— при оптимизации простых целевых функций (гладкие, один экстремум и т. п.), как правило, проигрыш по скорости генетических специализированным алгоритмам поиска.

В настоящее время генетические алгоритмы являются мощным вычислительным средством при решении разнообразных многомерных многообъектных задач оптимизации. Их использование для оптимизации сложных магнитооптических структур источников синхротронного излучения позволит упростить и ускорить процесс поиска удовлетворительных решений.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ МНОГООБЪЕКТНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР УСКОРИТЕЛЕЙ

При оптимизации магнитооптических структур источников синхротронного излучения, как правило, необходимо оптимизировать одновременно несколько целевых функций, которые взаимно конфликтуют друг с другом, поэтому некое единое решение поставленной задачи отсутствует. В этом случае необходимо проводить так называемую многообъектную оптимизацию, в процессе которой для описания характеристик целей вводится концепция «множества точек (в координатах искомым параметров) неуплучшаемых решений (так называемая оптимальность по Парето)» [2]. Неуплучшаемое решение есть такое решение, в котором улучшение одной из целей приводит к ухудшению другой. Таким образом, в случае многообъектной оптимизации «оптимизировать» означает найти область таких решений, в которой значения целевых функций были бы приемлемыми для постановщика задачи.

Поскольку многообъектная оптимизация является естественным развитием обычной численной или комбинаторной оптимизации, многие разработанные ранее методы были распространены на этот более общий случай. Для оптимизации магнитооптических структур источников синхротронного излучения нами был выбран один из наиболее эффективных эволюционных алгоритмов многообъектной оптимизации — генетический алгоритм с недоминируемой сортировкой (NSGA-II или Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) [3].

В силу специфических особенностей магнитооптических структур источников синхротронного излучения целевые функции при оптимизации нередко являются не гладкими и терпят разрывы. Например, при оптимизации сил квадрупольных линз с целью минимизации эмиттанса электронного пучка в процессе работы генетического алгоритма будет возникать большое количество неперiodических решений для амплитудных функций или решения с бесконечным/нефизическим значением целевой функции. Как правило, на начальном этапе работы генетического алгоритма преобладают «плохие» решения, что может приводить к быстрому вырождению популяции решений.

Для предотвращения вырождения популяции решений необходимо добавить в алгоритм оптимизации еще один инструмент (к уже имеющимся «селекции», «скрещиванию» и «мутации») — так называемый «элитаризм». При использовании концепции «элитаризма» наиболее приспособленные особи (точки в координатах значимых искомым параметров) предыдущего поколения сразу попадают в следующее поколение или сохраня-

ются в специальном контейнере под названием архив. Эти особи называются элитными. Таким образом, создается возможность более эффективного использования найденных в предыдущих итерациях решений, так как часто «хорошее» решение, полученное в ранних поколениях, может быть не достигнуто в последнем итоговом поколении. Также увеличивается скорость сходимости генетического алгоритма, поскольку при генерации популяций нового поколения особи архива обычно имеют больше шансов быть выбранными при селекции.

ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ «СИБИРЬ-2»

Накопитель электронов «Сибирь-2» [4] является источником синхротронного излучения в диапазоне энергий фотонов 10 эВ–100 кэВ с характеристической энергией фотонов из поворотных магнитов 7,2 кэВ. Магнитная структура накопителя «Сибирь-2» состоит из шести зеркально-симметричных суперпериодов, каждый из которых содержит по два 3-м прямолинейных промежутка. Промежутки с нулевой дисперсией предназначены для постановки сильнополевых сверхпроводящих вигглеров и ускоряющих ВЧ-резонаторов, а промежутки с ненулевой дисперсией — для размещения впускного магнита, слабополевых вигглеров, диагностического оборудования, систем обратных связей.

В настоящее время накопитель «Сибирь-2» работает в режиме «98 нм · рад» (название режима определяется величиной натурального горизонтального эмиттанса для энергии электронного пучка 2,5 ГэВ). Оптические функции для этого режима приведены на рис. 2, динамическая апертура — на рис. 3. Расчет динамической апертуры был выполнен с помощью программного обеспечения для исследования источников синхротронного излучения Ocelot [5].

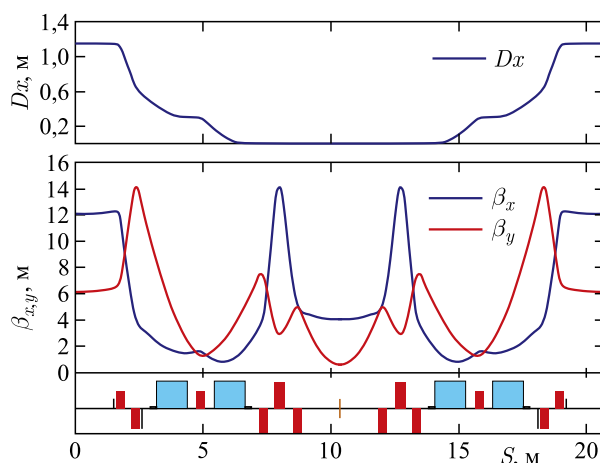


Рис. 2. Оптические функции накопителя «Сибирь-2» в режиме 98 нм · рад

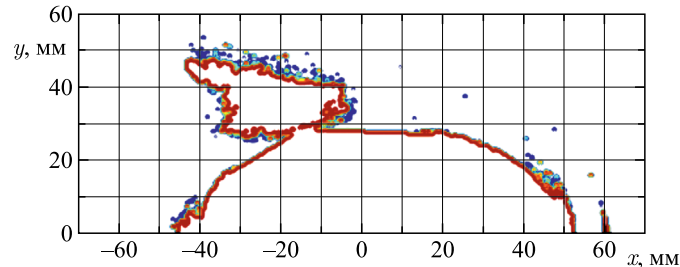


Рис. 3. Динамическая апертура накопителя «Сибирь-2» в режиме $98 \text{ нм} \cdot \text{рад}$ в центре дисперсионного промежутка

Основной целью оптимизации магнитооптической структуры накопителя «Сибирь-2» являлось максимальное уменьшение эмиттанса электронного пучка при условии сохранения геометрических размеров всех магнитных элементов, их азимутов расположения, схем их питания. Такой подход, в случае нахождения приемлемого решения, позволяет, «не трогая железа» и контролируя только токи возбуждения фокусирующих магнитных элементов, перейти к новой оптике без существенных затрат.

Магнитооптическая структура накопителя «Сибирь-2» содержит всего два семейства секступольных линз, поэтому для компенсации натурального хроматизма их силы будут определяться однозначно при любой настройке квадрупольных линз. Фактически, это условие определяет размер динамической апертуры в каждой конкретной магнитооптической структуре и не позволяет дополнительно оптимизировать динамическую апертуру.

Кроме того, для сохранения полной работоспособности накопителя при осуществлении оптимизации ключевых параметров необходимо соблюдение следующих дополнительных условий и ограничений:

- сохранения зеркальной симметрии суперпериода и шестикратной симметрии кольца и, соответственно, сохранения положения всех магнитных элементов и электрических схем питания;
- обеспечения сил квадрупольных линз в физически доступном диапазоне;
- близости к нулю горизонтальной дисперсионной функции в одном из прямолинейных промежутков;
- близости к π набега фазы горизонтальных бетатронных колебаний между прединфлектором и инфлектором;
- размеров электронного пучка, как минимум, в несколько раз меньше размеров динамической апертуры.

Таким образом, определим в качестве целевых функций горизонтальный эмиттанс электронного пучка и размер динамической апертуры (после компенсации хроматизма до нуля в обеих плоскостях). В качестве варьируемых параметров — силы всех квадрупольных линз, а оставшиеся условия будут являться дополнительными ограничениями в процессе оптимизации.

На рис. 4 представлены результаты работы алгоритма одновременной оптимизации эмиттанса и размера динамической апертуры. По оси абсцисс отложено значение натурального эмиттанса, а по оси ординат — величина, обратная размеру динамической апертуры в условных единицах. Каждая отдельная точка представляет собой одно из потенциально удовлетворительных решений. Синие точки являются «Парето оптималь-

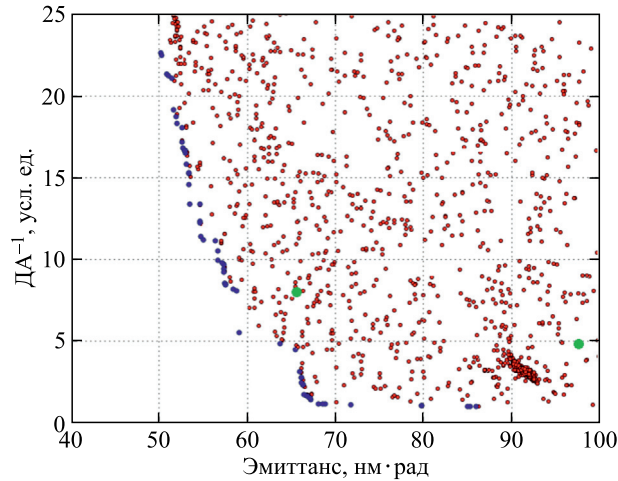


Рис. 4 (цветной в электронной версии). «Фронт Парето» при оптимизации магнитооптической структуры накопителя «Сибирь-2». Синие точки — «оптимальные решения Парето»; зеленые точки — начальные приближения; красные точки — остальные решения

ными решениями», образующие «фронт Парето», две зеленые точки (ранее исследованные структуры с эмиттансом 98 нм·рад и 66 нм·рад) — используемые начальные приближения, красные точки — все остальные решения.

Таким образом, в качестве результатов проведенной с помощью генетического алгоритма оптимизации отметим, что существуют две потенциальные возможности. Первая — уменьшить эмиттанс до 55–65 нм·рад при сохранении размера динамической апертуры, близкого к ее размеру в действующей структуре. Вторая — увеличить размер динамической апертуры более чем в два раза при сохранении эмиттанса на уровне 85–100 нм·рад, как в действующей структуре. Структуры с эмиттансом менее 50 нм·рад не представляют особого интереса, так как имеют малую динамическую апертуру.

Представленный на рис. 4 фронт Парето достаточно хорошо отображает возникающие ограничения на величины достигаемых значений целевых функций. В процессе оптимизации, при ослаблении или ужесточении накладываемых ограничений, различные участки фронта могут перемещаться в ту или иную сторону. Исходя из этого, можно быстро выбрать приемлемое решение и использовать его в качестве начального приближения для более точной подстройки магнитооптической структуры под требуемые параметры.

Из получившегося множества оптимальных решений Парето в нашем случае наибольший интерес с практической точки зрения представляют решения для двух вариантов магнитооптических структур, находящихся в области с эмиттансом 90–100 нм·рад и 60–70 нм·рад. Основными критериями выбора являлись полученные значения сил квадрупольных и секступольных линз, а также поведение оптических функций.

В диапазоне эмиттансов 90–100 нм·рад была выбрана магнитооптическая структура с эмиттансом 94 нм·рад, оптические функции и динамическая апертура которой изображены на рис. 5 и 6. В результате оптимизации удалось существенно увеличить размер динамической апертуры: более чем в два раза по обеим координатам. При этом эмиттанс электронного пучка, а также силы большинства квадрупольных и секступольных линз

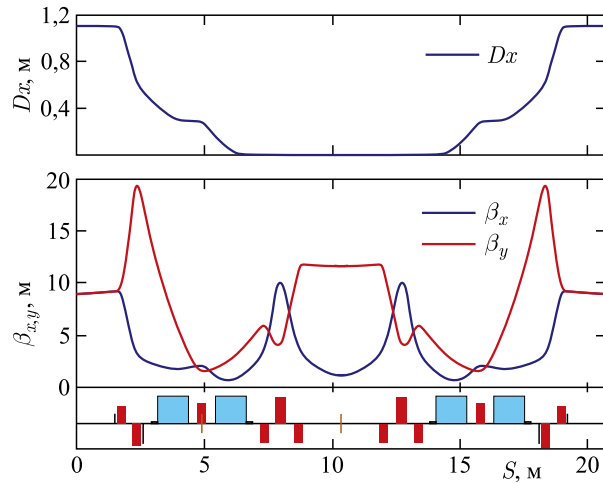


Рис. 5. Оптические функции накопителя «Сибирь-2» (после оптимизации, эмиттанс 94 нм · рад)

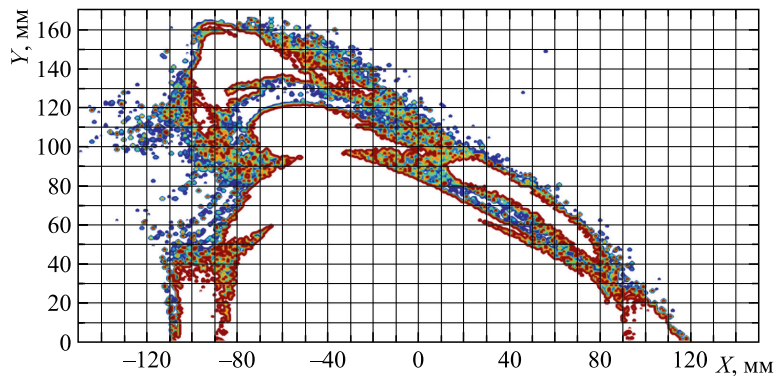


Рис. 6. Динамическая апертура накопителя «Сибирь-2» (после оптимизации, эмиттанс 94 нм · рад)

остались примерно на том же уровне, что и в действующей структуре. Максимальным увеличением силы квадрупольной линзы оказалось у самой слабой и составило $\sim 10\%$, а максимальное уменьшение — у одной из самых сильных и составило $\sim 50\%$, что должно способствовать более щадящему режиму работы источников питания.

Приведенная на рис. 5 структура позволяет легко варьировать эмиттанс электронного пучка в относительно широком диапазоне (80–110 нм · рад) изменением силы квадрупольной линзы, находящейся между двумя поворотными магнитами. Большая сила линзы будет соответствовать меньшему эмиттансу. При этом размер динамической апертуры будет изменяться незначительно.

Для уменьшения эмиттанса электронного пучка необходимо увеличение сил всех квадрупольных и секstupольных линз, что естественным образом приводит к уменьшению размера динамической апертуры, это хорошо видно на рис. 4.

Из диапазона величин эмиттанса 60–70 нм·рад была выбрана магнитооптическая структура с эмиттансом 67 нм·рад. Ее оптические функции и динамическая апертура изображены на рис. 7 и 8.

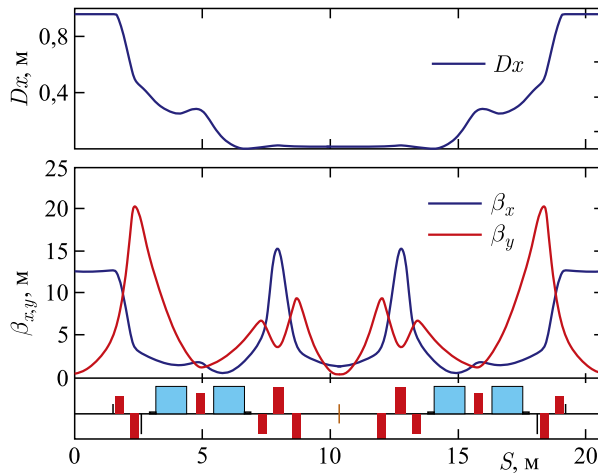


Рис. 7. Оптические функции накопителя «Сибирь-2» (после оптимизации, эмиттанс 67 нм·рад)

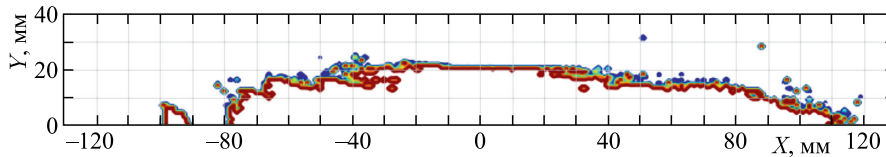


Рис. 8. Динамическая апертура накопителя «Сибирь-2» (после оптимизации, эмиттанс 67 нм·рад)

Из особенностей полученной структуры 67 нм·рад стоит отметить достаточно большой размер горизонтальной динамической апертуры (более чем в 1,5 раза больше, чем в действующей структуре) при вертикальном размере 10 мм. При большем вертикальном размере динамической апертуры (до 20 мм) горизонтальный размер уменьшается и становится сопоставимым с размером в действующей структуре. Данные особенности поведения размера динамической апертуры не должны привести к ухудшению эффективности инжекции.

Приведенная магнитооптическая структура 67 нм·рад является вполне допустимым результатом оптимизации. Однако в этой структуре по сравнению со структурой 94 нм·рад и с действующей структурой (98 нм·рад) режим работы источников питания будет более жестким, а сами линзы — близкими к насыщению.

При ослаблении или ужесточении дополнительных условий, используемых при оптимизации, можно достичь существенных изменений значений целевых функций. Так, например, при исключении из определенных ранее условий «зануления» горизонтальной дисперсии в каждом втором промежутке и условия набега фазы горизонтальных бетатронных колебаний (равного π) между прединфлектором и инфлектором можно получить

уменьшение эмиттанса электронного пучка вплоть до значений, близких к теоретически минимальному значению эмиттанса для магнитооптической структуры накопителя «Сибирь-2» [6]. Однако работа источника синхротронного излучения «Сибирь-2» в подобных структурах с очень малым эмиттансом не представляется возможной из-за длительной остановки на модернизацию и, следовательно, прекращения работ на станциях синхротронного излучения.

Таким образом, с учетом этих факторов на данный момент для источника синхротронного излучения «Сибирь-2» наиболее оптимальной будет работа в одной из двух приведенных выше магнитооптических структур или близких к ним.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали эффективность использования генетических алгоритмов при оптимизации комплексных задач ускорительной физики. С их помощью можно за приемлемое время найти удовлетворительное решение задачи без использования начального приближения или имея минимум информации о параметрах исследуемой системы. Это является особенно важным при оптимизации нелинейных задач с большим количеством оптимизируемых переменных.

Полученные магнитооптические структуры выглядят вполне рабочими и по некоторым основным параметрам превосходят известные ранее. Для работы с этими магнитооптическими структурами, однако, необходимо преодолеть ряд технических сложностей, в первую очередь связанных с перенастройкой инжекционной части источника синхротронного излучения «Сибирь-2» и нетривиального процесса «подъема» энергии электронного пучка.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00336 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков Л. А. Генетические алгоритмы: Учеб. пособие. Изд. 2-е. М.: Физматлит, 2006. 320 с.
2. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: Физматлит, 2002. 176 с.
3. Deb K. A Fast and Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II // IEEE Trans. Evol. Comp. 2002. V. 6, No. 2. P. 182–197.
4. Anashin V. V. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1989. V. 282. P. 369.
5. Agapov I. et al. OCELOT: A Software Framework for Synchrotron Light Source and FEL Studies // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 768. P. 151–156.
6. Fomin Ye., Korchuganov V., Smygacheva A. The Use of Multi-Objective Genetic Algorithms for Accelerator and Light Source Optimization // Proc. of RuPAC 2016. P. 376–378.

Получено 18 апреля 2017 г.