



УДК 621.3.077, 681.51

DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).84-94

Темгенеvская Татьяна Вениаминовна,
старший преподаватель,
Братский государственный университет,
e-mail: uts@brstu.ru

T. V. Temgenevskaya,
Asst. Prof., Bratsk State University,
e-mail: uts@brstu.ru

Информация о статье
Дата поступления: 25 июля 2017 г.

Article info
Received: Jun 25, 2017

МЕТОДЫ НАСТРОЙКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

METHODS OF SETTING AUTOMATIC EXCITATION REGULATORS OF SYNCHRONOUS GENERATORS

Аннотация. Устойчивая работа электроэнергетических систем (ЭЭС) зависит от множества факторов и, в том числе, от выбора настроек автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) синхронных генераторов. В современных ЭЭС в условиях широкого применения силовой полупроводниковой техники, а также установок распределённой генерации остаются актуальными задачи определения оптимальных (допустимых) коэффициентов настройки АРВ синхронных генераторов с целью обеспечения требований по устойчивости и качеству переходных процессов. Для развития и модернизации технологий настройки АРВ генераторов необходим тщательный анализ применяемых методов, обзор которых приведен в статье. В результате проведенного анализа сделан вывод о том, что разработка алгоритмов настройки АРВ по экспериментальным частотным характеристикам и кривым D-разбиения является перспективным направлением и требует дальнейших исследований.

В работе также предложен алгоритм поиска вектора допустимых настроек АРВ генераторов внутри линейной области ограничений на основе градиентного метода решения системы линейных неравенств, позволяющий обеспечить устойчивую работу ЭЭС, а в сочетании с прогностическими алгоритмами - получить необходимый запас устойчивости и хорошие демпферные свойства регуляторов без использования трудоемкой процедуры оптимизации.

Ключевые слова: автоматический регулятор возбуждения, методы настройки, градиентный метод, D-разбиение, устойчивость, синхронный генератор, электроэнергетическая система.

Abstract. Stable operation of electric power systems (EPS) depends on many factors, including the selection of setting automatic excitation regulators (AER) of synchronous generators. In today's EPS, in the context of widespread development and use of the power semi-conductor technology as well as distributed generation plants, the problems of determining the optimal (acceptable) setting factors of the AER synchronous generators to ensure the requirements of sustainability and quality of transient processes are still relevant. The development and modernization of the AER generator setting technologies requires careful analysis of the methods applied, the overview of which is given in the article. The analysis concluded that the development of algorithms for the experimental AER setting and frequency response curves of D-decomposition is promising and requires further research. The paper also provides a search algorithm for a vector of permissible settings for the AER generators within the linear range of restrictions based on the gradient method for solving a system of linear inequalities, allowing us to ensure stable operation of the electric power system, and when combined with predictive algorithms, it will provide the necessary margin of stability and good damping properties of regulators without time-consuming optimization procedures.

Keywords: automatic excitation regulator, setting methods, gradient method, D-decomposition, stability, synchronous generator, electric power system.

Введение.

Повысить запаса статической устойчивости и улучшить демпферные свойства электроэнергетических системах (ЭЭС) позволяют автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) синхронных генераторов. Устойчивая работа генераторов зависит от правильного определения настроек АРВ. Решением этой задачи занимались следующие отечественные ученые: А. А. Горев, П. С. Жданов, Н. И. Соколов, В. А. Веников, М. М. Ботвинник, О. В. Щербачев, Г. Р. Герценберг, М. Л. Левинштейн, С. А. Совалов, В. В. Бушуев, В. А. Бариннов, Н. И. Овчаренко, А. А. Юрганов, Н. И. Воропай, Е. И. Ушаков, И. А. Груздев, А. С. Зеккель, А. А. Рагозин, А. Х. Есипович, А. Н. Дойников и другие. Из зарубежных ученых следует отметить следующих: R. H. Park, N. Martins, I. J. Perez-Arriaga, E. V. Larsen, G. Cron, P. M. Anderson, A. A.

Fouad, P. Kundur, D. Concordia, M. A. Pai, M. Klein, G. J. Rogers и другие.

В современных ЭЭС в условиях широкого применения силовой полупроводниковой техники, а также установок распределённой генерации (РГ) остаются актуальными задачи определения оптимальных (допустимых) коэффициентов настройки АРВ синхронных генераторов с целью обеспечения требований по устойчивости и качеству переходных процессов. Для развития технологий настройки АРВ генераторов необходимо провести тщательный анализ существующих методов, обзор которых приводится в статье. Кроме того, подробно рассматривается предлагаемый автором градиентный метод определения допустимой настройки АРВ, обеспечивающий устойчивую работу ЭЭС.



Краткий обзор методов настройки АРВ синхронных генераторов

В середине 50-х годов XX в. начали разрабатываться программы для ЭВМ по расчёту колебательной устойчивости, которые основывались на частотных методах [1-4]. Эти программы использовались для анализа влияния параметров стабилизации на области колебательной устойчивости. Дальнейшее совершенствование алгоритмов выполнялось по пути рационализации исходных уравнений для целей совместной оптимизации параметров АРВ нескольких станций [5-7]. Такая задача решалась путём поочередного расчёта кривых равной степени устойчивости на основе программ с процедурой D -разбиения.

К 80-м годам XX в. стали проявляться недостатки метода D -разбиения, особенно при поиске настроек АРВ сложных многомашинных ЭЭС [8, 9]. В связи с этим были выполнены некоторые усовершенствования процедур оптимизации настроек АРВ [10, 11]. Развитие метода D -разбиения привело к совместному применению алгебраических и частотных критериев устойчивости [12], а также к построению трёхмерных областей устойчивости [12, 13]. Совершенствование частотных методов позволило разработать адаптивные алгоритмы настройки АРВ с использованием экспериментальных данных [14-21]. Данное направление является перспективным и требует дальнейших исследований.

Под руководством А. С. Зеккеля был разработан подход последовательной настройки АРВ, который использовал интегральный критерий полной энергии системы [22, 23].

Ввиду сложности решения рассматриваемой задачи в практике эксплуатации ЭЭС для настройки АРВ большое распространение получил разработанный А. А. Юргановым и В. А. Кожевниковым (НИИ «Электромаш») метод последовательной настройки, основанный на замене внешней сети исследуемой станции эквивалентной схемой «линия - шины бесконечной мощности», что дало возможность использовать имеющийся для простых схем опыт исследований применительно к конкретным условиям [24, 25].

Рассмотренные традиционные методы настройки АРВ, как правило, позволяют выполнять одновременную координацию только двух параметров. При этом градиентные методы оптимизации позволяют осуществлять многопараметрическую координацию настроек АРВ, но при их использовании накладываются следующие ограничения на вид и свойства целевой функции: обеспечение дифференцируемости, неразрывности и др. В результате возможно получение в качестве

решения локального оптимума. Для преодоления указанных недостатков в работах [26-32] предлагается методика оптимизации настроек АРВ на основе генетического алгоритма.

В работах [29, 33-37] предложена методика согласованной настройки АРВ и автоматических регуляторов частоты вращения (АРЧВ) синхронных генераторов. При этом исследования, проводимые на компьютерных моделях ЭЭС как для мощных генераторов [29-33], так и для установок РГ [34-38], показывают, что согласованная настройка АРВ и АРЧВ позволяет улучшить демпферные свойства системы, повысить запас устойчивости и получить дополнительные эффекты в виде улучшения показателей качества переходных процессов и качества электроэнергетики.

Необходимо также отметить, что в последнее время выделяются разработки систем управления возбуждением синхронных генераторов на основе технологий искусственного интеллекта (ТИИ), в частности с применением нечётких систем [39-42], нейронных сетей [43, 44] и мультиагентных технологий [38, 45].

При необходимости оперативного ввода в эксплуатацию энергообъектов, например установок РГ, работающих на основе синхронных генераторов, перспективным является применение прогностических алгоритмов, построенных на основе типовых законов регулирования. Эксперименты на компьютерных моделях систем электрооборудования с установками РГ [46, 47] показывают, что прогнозирующие звенья обеспечивают устойчивость работы генераторов без использования дорогостоящей процедуры идентификации динамических характеристик и расчёта оптимальных настроек АРВ. Учитывая, что поиск оптимальных настроек АРВ генераторов представляет весьма трудоёмкую и не всегда обоснованную процедуру, на практике целесообразно заменить оптимальное решение допустимым, при котором не ставится условие достижения наилучших в смысле заданной целевой функции значений параметров настройки. При этом все векторы, принадлежащие допустимой области, рассматриваются равноценными, за счёт чего может быть исключён трудоёмкий этап оптимизации. Таким образом, достаточно определить допустимые значения регулируемых параметров, поддерживая которые, можно обеспечить устойчивую работу ЭЭС, а в сочетании с прогностическими алгоритмами возможно будет получить необходимый запас устойчивости и хорошие демпферные свойства регуляторов, что собственно требует дополнительных исследований. Ниже предлагается градиентный метод поиска допустимой настройки АРВ генераторов.



Градиентный метод поиска допустимой настройки АРВ

Рассмотрим алгоритм координации настроек АРВ с одинаковыми значениями параметров настройки градиентным методом.

В общем случае под градиентными методами будем понимать пошаговую процедуру, в которой направление движения в пространстве из исходной точки осуществляется по градиенту какой-либо функции. Алгоритм отличается итерационным характером, заключающимся в построении последовательности точек x_k ($k = 0, 1, 2, \dots$), которая сходится к решению задачи (нахождению допустимого решения). При этом каждая последующая точка связана с предыдущей соотношением:

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k \cdot S_k,$$

где S_k – вектор перемещения из начальной точки x_k (градиент); α_k – длина шага по направлению градиента S_k .

Если x_k – внутренняя точка области допустимых решений, то S_k – градиент функции в точке x_k ; в противном случае S_k есть антиградиент.

Идея «вывода» точки на границу i -го неравенства положена в основу решения задачи «перевода» произвольной точки пространства в заданную область, ограниченную многогранником допустимых решений, отвечающих системе линейных неравенств. Область решения системы линейных неравенств $G_i(x) = A_{ij} \cdot x_j \leq B_i$, $i = \overline{1, m}$, задается выпуклым многогранником в n -мерном пространстве E_n . Этот многогранник образован пересечением полупространств, заданных неравенствами.

Произвольная точка x_k делит множество полупространств (линейных неравенств), образующих область G , по отношению к себе на два подмножества. Первое включает в себя точку x_k и составляет подмножество выполнимых ограничений $M1$: $(A_i, x_k) \leq B_i$, $i \in M1$. Второе составляет подмножество невыполнимых ограничений $M2$: $(A_l, x_k) \leq B_l$, $l \in M2$. В результате образуется полупространство, ограниченное линейными неравенствами вида:

$$\begin{cases} A_{i1} \cdot X_{k1} \leq B_{i1} \\ A_{i2} \cdot X_{k2} \leq B_{i2} \\ \dots \\ A_{in} \cdot X_{kn} \leq B_{in} \end{cases} \quad (1)$$

Задача решения системы линейных неравенств (отыскания допустимых значений коэффициентов настройки регуляторов, обеспечивающих устойчивость) сводится к тому, чтобы за некото-

рое конечное число шагов n перейти из точки x_k ($x_k \in E_n$; $x_k \notin G$) в точку x_{k+n} ($x_{k+n} \in E_n$; $x_{k+n} \in G$). Такую пошаговую процедуру можно организовать следующим образом: каждую новую последовательность x_{k+1} строить так, чтобы на каждом шаге итерации поочередно все неравенства переводились из подмножества невыполнимых ограничений $M2$ в подмножество выполнимых ограничений $M1$. Для этого необходимо из точки x_k по кратчайшему пути перейти в точку x_{k+1} , находящуюся на границе l -го неравенства (невыполнимого по отношению к x_k), где выполняется соотношение $(A_l, x_{k+1}) = B_l$, $l \in M1$. Здесь A_l – направление градиента к $G_l(x)$; $A_l = G_l(x)$.

Тогда точка x_{k+1} строится как

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k \cdot \overline{A_l}, \quad (2)$$

где $\overline{A_l}$ – направление антиградиента к функции « l »-ограничений.

Длина шага определяется по выражению:

$$\alpha_k = \frac{(A_l \cdot x_k) - B_l}{|A_l|^2}. \quad (3)$$

Приведённые итерации выполняются до тех пор, пока все подмножества невыполнимых ограничений $M2$ не перейдут в подмножество выполнимых ограничений $M1$, т. е. пока подмножество $M2$ не станет пустым.

В общем случае точка, которая будет решением системы неравенств, может быть получена на $(k+n)$ -м шаге. Очевидно, количество итераций $n \leq L$, где L – количество невыполнимых ограничений для x_k .

При решении системы линейных ограничений градиентным методом не возникает затруднений, связанных с вычислением векторов градиентов, они заданы естественным образом в виде строк матрицы A в системе ограничений $(A_i, x_k) \leq B_i$.

Представленная процедура поиска допустимых решений градиентным методом может быть адаптирована к поиску настроек АРВ генераторов ЭЭС для обеспечения её устойчивой работы; при этом последовательность действий следующая:

1. Определение собственных значений системы с помощью промышленных программно-исследовательских комплексов (например, «Мустанг» и «Поиск»), по которым можно судить об устойчивости ЭЭС. Если все собственные значения системы отрицательны, то параметры АРВ



не изменяются, в противном случае выполняются последующие этапы.

2. Построение кривых D -разбиения для каждого генератора и перенос их в одну плоскость для получения полной картины их взаимного расположения.

3. Выделение эквивалентной линейной области устойчивости генераторов по характерным точкам пересечения кривых D -разбиения с осями настроечных параметров АРВ (K_f и K_f').

4. Аппроксимация эквивалентной линейной области в виде системы линейных ограничений вида (1).

5. Нахождение невыполнимого ограничения в системе линейных неравенств и, соответственно, направление спуска.

6. Определение длины шага антиградиента S_{k+1} к функции невыполнимого ограничения по формуле (3).

7. Определение новых значений настроек АРВ (K_f и K_f') по формуле (2).

8. На основе полученных настроек АРВ, делается вывод об устойчивости ЭЭС и при необходимости процедура повторяется.

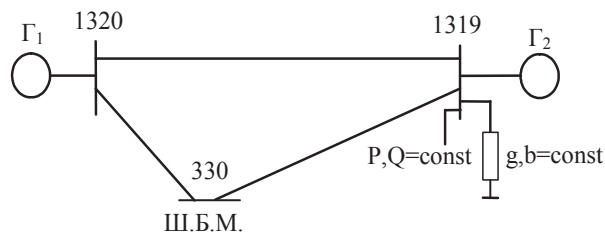
Достоинствами предложенной процедуры поиска допустимого решения являются: простота, т. к. не возникает сложностей при вычислении векторов градиентов, которые задаются в виде строк матрицы в системе ограничений; возможность получения одинаковых по значению настроечных коэффициентов, что ускоряет процесс стабилизации в реальном времени; обеспечение необходимой статической устойчивости энергосистемы. Достоверность результатов и эффективность рассмотренной процедуры подтверждаются сравнением результатов поиска коэффициентов стабилизации регуляторов с результатами оптими-

зации настроек коэффициентов с применением классической процедуры D -разбиения при использовании математического описания и ПК «Мустанг» и «Поиск» [48-51].

Пример поиска допустимых настроек АРВ градиентным методом.

Исследования проводились на примере двухмашинной тестовой схемы (рис. 1), в которой каждый генератор оснащён АРВ-СД (сильного действия) и связан с шинами бесконечной мощности (ШБМ) (рис.1).

Структурная схема регулятора сильного действия типа АРВ-СД, используемая в тестовой схеме, представлена на рис.2 [48]. Эта модель, как правило, используется при ненулевых значениях K_{ou} и каком-либо из коэффициентов стабилизации, например K_f' и K_f' .



Р

Рис. 1. Тестовая схема энергосистемы

Предположим, что все коэффициенты каналов регулирования по напряжению (ΔU) и току ротора (I_R) генераторов имеют рабочие значения и остаются неизменными в процессе поиска настроек АРВ. При этом структурно-функциональную схему контура регулирования по частоте с учётом фиксации параметров остальных каналов удобно представить так, как показано на рис. 3.

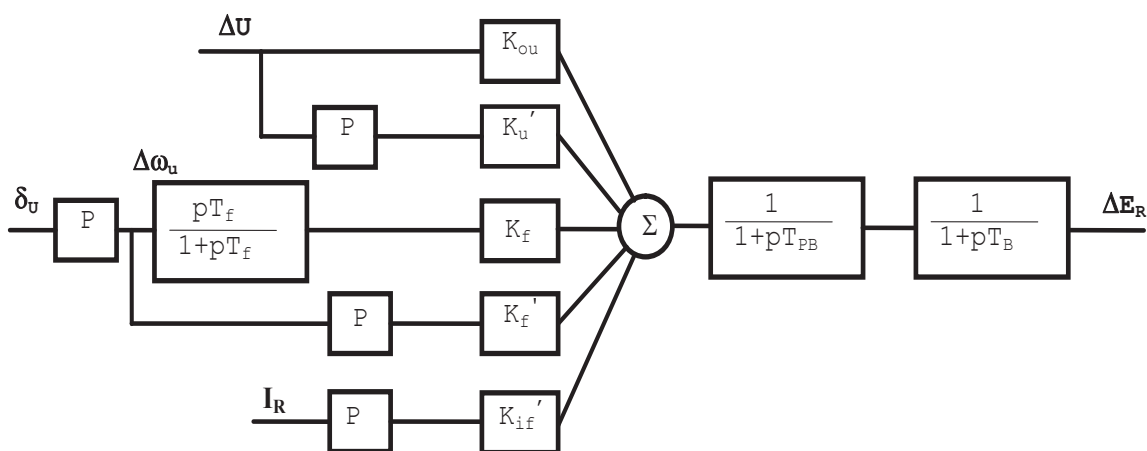


Рис. 2. Структура используемого АРВ-СД

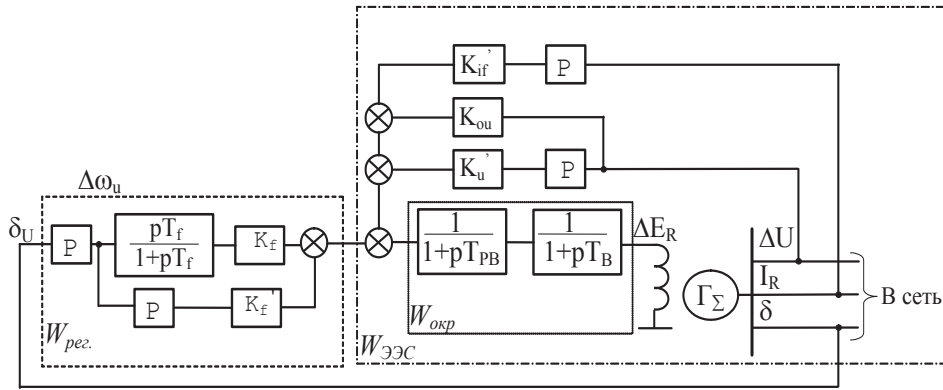


Рис. 3. Структурно-функциональная схема контура стабилизации

Объединение функциональных блоков приведённой на рис. 3 схемы выполним следующим образом:

$$W_{рег.} = K_f \cdot \frac{p^2 T_f}{1 + p T_f} + K'_f p^2,$$

$$W_{опр.} = \frac{1}{1 + p T_{РВ}} \cdot \frac{1}{1 + p T_{В}},$$

где $W_{рег.}$ – передаточная функция каналов регулирования по частоте; $W_{опр.}$ – передаточная функция общего канала.

Одноконтурная схема регулирования возбуждения синхронного генератора может быть представлена структурами, показанными на рис. 4 и 5. При этом передаточная функция замкнутого контура регулирования будет описываться следующим образом [48]:

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 - W_p(p) \cdot W_{рег.}(p)},$$

где $W_3(p)$ – исходная передаточная функция замкнутого контура регулирования; $W_p(p)$ – неизвестная передаточная функция разомкнутого контура регулирования, которая может быть представлена как $W_p(p) = \frac{1}{W_{рег.}(p)}$; $W_{рег.}(p)$ – передаточная функция регулятора, параметры и структура которого известны.

Таким образом, комплексные передаточные коэффициенты выделенного канала АРВ-СД и разомкнутой системы запишутся так:

$$W_{рег.}(j\omega) = \frac{-\omega^2((K_f T_f + K'_f) + \omega^2 K'_f T_f^2)}{1 + \omega^2 T_f^2} + j \frac{\omega^3 T_f((K_f T_f + K'_f) - K'_f)}{1 + \omega^2 T_f^2};$$

$$W_p(j\omega) = \frac{(K_f T_f + K'_f) + K'_f \omega^2 T_f^2}{\omega^2 (K_f T_f + K'_f)^2 + K'_f \omega^4 T_f^2} + j \frac{\omega T_f((K_f T_f + K'_f) - K'_f)}{\omega^2 (K_f T_f + K'_f)^2 + K'_f \omega^4 T_f^2}.$$

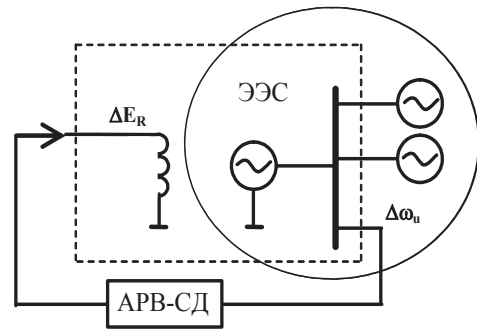


Рис. 4. Схема регулирования возбуждения эквивалентного генератора

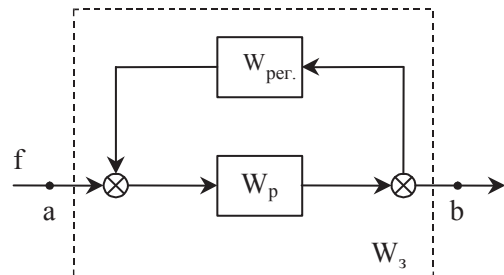


Рис. 5. Одноконтурная система

Примем некоторые исходные значения настроечных коэффициентов АРВ (пусть для удобства это будут нули) и найдём частоты и затухания составляющих движения системы для определения статической устойчивости исследуемого режима (табл. 1). Как видно из табл. 1, система находится в неустойчивом состоянии, т. к. присутствуют положительные действительные части составляющих движения системы.



Т а б л и ц а 1

Доминирующие собственные значения системы	
Затухание	Частота
0,10632	1,1637
-1,0000	

Для исследуемого режима строим с помощью ПК «Поиск» кривые *D*-разбиения в координатах коэффициентов регуляторов K_f и K_f' для обоих генераторов (рис. 6).

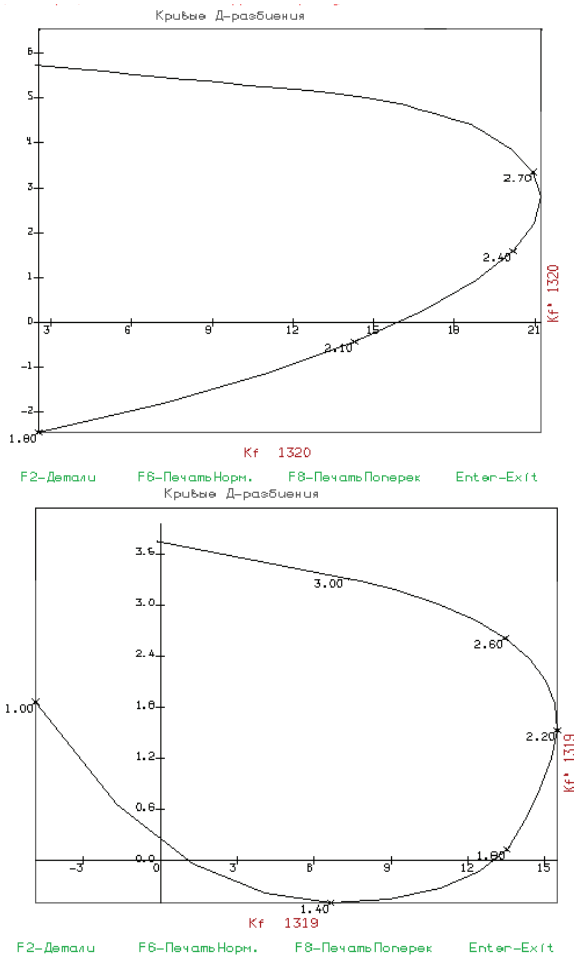


Рис. 6. Кривые *D*-разбиения:
а - для генератора 1320; б - для генератора 1319

Предлагаемый метод поиска допустимых значений коэффициентов регуляторов предполагает получение новых настроечных параметров АРВ генераторов с одинаковыми значениями, обеспечивающими устойчивое состояние рассматриваемой системы, т. е. $K_f(1319) = K_f(1320)$ и $K_f'(1319) = K_f'(1320)$.

Для построения эквивалентной линейной области перенесём кривые *D*-разбиения генераторов в координаты настроечных коэффициентов (K_f ; K_f') и аппроксимируем эту область путём определения характерных точек пересечения кривых *D*-разбиения с осями коэффициентов регуля-

торов (рис. 7). При выборе значений коэффициентов регуляторов будем учитывать, что их значения должны находиться в диапазоне 0...10. Это обусловлено технологическими требованиями настроек рассматриваемых регуляторов.

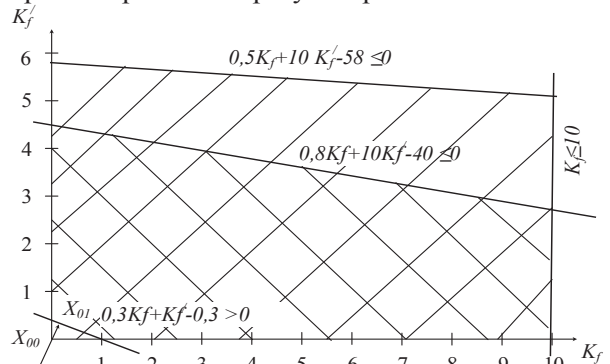


Рис. 7. Область, полученная аппроксимацией кривых *D*-разбиения

В рассматриваемом случае область допустимых значений настроечных параметров можно описать системой линейных неравенств, полученной путем аппроксимации области при наложении кривых *D*-разбиения друг на друга:

$$\begin{cases} 0,8K_f + 10K_f' - 40 \leq 0 \\ 0,3K_f + K_f' - 0,3 \geq 0 \\ 0 \leq K_f \leq 10 \\ 0 \leq K_f' \leq 10 \end{cases}$$

Процедуру нахождения решения системы неравенств начинаем с точки X_{00} с координатами (0;0). Решая систему линейных неравенств с использованием алгоритма итераций, определим искомые пары коэффициентов $K_f(1319) = K_f(1320)$ и $K_f'(1319) = K_f'(1320)$. В результате выполненных действий получили новую точку X_{01} с координатами $K_f = 0,8$ и $K_f' = 2,8$. Подставляя координаты новой точки в систему неравенств, убеждаемся в правильности полученного решения.

Таким образом, принимаем значения настроечных коэффициентов (K_f , K_f') генераторов 1319 и 1320 равными: $K_f(1319) = K_f(1320) = 0,8$ и $K_f'(1319) = K_f'(1320) = 2,8$. Частоты и затухания колебательных составляющих движения системы с учётом новых коэффициентов регуляторов представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Доминирующие собственные значения системы

Затухание, 1/с	Частота, Гц
- 1,0019	
- 1,0059	
- 1,0177	1,0066



В связи с тем, что действительные части собственных значений системы, характеризующие затухания составляющих движения, отрицательны, делаем вывод, что при новых настройках регуляторов система будет устойчива.

Таким образом, предложен алгоритм поиска вектора улучшенных настроек регуляторов внутри линейной области ограничений на основе градиентного метода решения системы линейных неравенств.

Заключение

1. Приведённый обзор методов настройки АРВ синхронных генераторов показал, что разработка адаптивных алгоритмов настройки с использованием экспериментальных частотных характеристик и кривых D -разбиения является перспек-

тивным направлением и требует дальнейших исследований.

2. Предложенный алгоритм поиска вектора допустимых настроек АРВ генераторов внутри линейной области ограничений на основе градиентного метода решения системы линейных неравенств позволяет обеспечить устойчивость работы генераторов.

3. Описанный метод поиска допустимых значений настроек АРВ генераторов позволяет обеспечить устойчивую работу ЭЭС, а в сочетании с прогностическими алгоритмами позволит получить необходимый запас устойчивости и хорошие демпферные свойства регуляторов без использования трудоёмкой процедуры оптимизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горюнов Ю.П., Щербачев О.В. Программа для расчета статической устойчивости сложных электрических систем // Труды ЛПИ. 1967. № 291. С. 98–103.
2. Лукашов Э.С., Бушуев В.В. О структурных схемах и частотных характеристиках электрических систем // Изв. СО АН СССР. Сер.: Техн. наук. 1968. №8. С. 3–10.
3. Веников В.А., Васин В.П. Анализ статической устойчивости сложных электрических систем и частотные методы // Тр. СибНИИЭ. Новосибирск. 1972. Вып. 21. С. 3–8.
4. Строев В.А., Карасев Е.Д. Вопросы построения рационального алгоритма расчета областей статической устойчивости электроэнергетических систем // Изв. РАН СССР. Энергетика и транспорт. 1979. № 3. С. 37–45.
5. Горюнов Ю.П., Левинштейн М.В., Щербачев О.В. Методика определения оптимальных параметров регулирования в сложных линеаризованных системах с несколькими регулируемыми объектами // Тр. Ленингр. политех. ин-та. 1968. № 293. С. 67–70.
6. Горюнов Ю.П. Комплекс программ для исследования статической устойчивости по самораскачиванию сложных электрических систем // Моделирование электроэнергетических систем : тез. докл. Всесоюз. научн. конф. Баку, 1982. С. 221–222.
7. Алгоритм численной оптимизации параметров АРВ генераторов сложной электроэнергетической системы / Г.Н. Жененко и др. // Тр. Ленингр. политех. ин-та. 1982. № 385. С. 16–21.
8. Груздев И.А., Екимова М.М. Основные задачи исследования сильного регулирования возбуждения генераторов сложных электроэнергетических систем // Труды Ленингр. политех. ин-та. 1982. № 385. С. 3–12.
9. Симонова К.Ж., Строев В.А. Вопросы выбора параметров АРВ в сложных электроэнергетических системах // Изв. РАН СССР. Энергетика и транспорт. 1987. №5. С. 61–71.
10. Груздев И.А., Устинов С.М., Ладвищенко Б.Г., Юрганов А.А. Координация настроек АРВ-СД генераторов сложных электроэнергетических систем // Вопросы устойчивости сложных электрических систем : сб. научн. тр. ин-та Энергосеть-проект. М. : Энергосетьпроект, 1985. С. 205–213.
11. Зеккель А.С. Оценка качества регулирования и методика настройки стабилизации АРВ генераторов // Электричество. 1988. № 5. С. 15–21.
12. Дойников А.Н., Косинцева Е.В. Синтез системы автоматического управления с использованием кривых D -разбиения // Тр. Брат. гос. ун-та: Сер.: Естественные и инженерные науки - развитию регионов Сибири. Т. 1. Братск : БрГУ, 2008. 229 с.
13. Игнатьев И.В., Пьянников Е.Д. Методика построения трехмерной параметрической области D -разбиения // Брат. гос. ун-та: Сер.: Естественные и инженерные науки - развитию регионов Сибири. Т. 1. Братск : БрГУ, 2008. 229 с.
14. Дойников А.Н., Игнатьев И.В. Алгоритм оперативного выбора настроек АРВ сильного действия // Труды ЛПИ. 1984. № 399. С. 27–31.
15. Комплекс программ для исследования возмущенного движения сложных ЭЭС и алгоритмов адаптации регуляторов возбуждения / Ю.П. Горюнов и др. // Труды ЛПИ. 1988. № 427. С. 16–25.
16. Методика координации настроек АРВ-СД в энергосистемах на основе экспериментальных данных / И.А. Груздев и др. // Труды ЛПИ. 1988. № 427. С. 55–61.
17. Булатов Ю.Н., Дьяконица С.А. Алгоритм непараметрической идентификации ЭЭС для получения оптимальных коэффициентов стабилизации АРВ генераторов // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2009. Т. 1. С. 7–11.
18. Булатов Ю.Н., Игнатьев И.В. Определение оптимальных коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ по непараметрическим моделям турбогенераторов электростанций // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 3. С. 70–74.
19. Булатов Ю.Н., Игнатьев И.В. Программный комплекс для идентификации электроэнергетических систем и оптимизации коэффициентов стабилизации автоматических регуляторов возбуждения // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 4 (8). С. 106–113.
20. Игнатьев И.В., Ковров А.Е. Алгоритм выбора настроек автоматических регуляторов возбуждения в многомашинных энергосистемах // Вестник Сибир. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2010. № 1 (27). С. 24–29.
21. Игнатьев И.В., Булатов Ю.Н. Модели и методы настройки систем регулирования возбуждения генераторов на основе экспериментальных данных. Братск : Изд-во БрГУ, 2016. 278 с.



22. Зеккель А.С., Муратаев А.А., Черкасский А.В. Методика экспериментального определения областей колебательной устойчивости и кривых равного качества регулирования / И.М. Гольдштейн и др. // Труды ЛПИ. 1984. № 399. С. 32–36.
23. Алгоритм и программа для оценки эффективности управления возбуждением генераторов энергообъединения / И.М. Гольдштейн и др. : сб. науч. тр. Л. : Энергоатомиздат, 1987. С. 99–105.
24. Юрганов А.А. Методы и средства автоматического регулирования возбуждения турбо- и гидрогенераторов // Творческое наследие академика М.П. Костенко и его значение для современного и перспективного электромашиностроения. СПб. : Наука, 1992. С. 132–158.
25. Юрганов А.А., Кожевников В.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. СПб. : Наука, 1996. 138 с.
26. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Настройка АРВ-СД генератора методом стандартных коэффициентов с применением генетического алгоритма // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2008. Т.1. С. 18–24.
27. Сорокин Д.В. Выбор настроек АРВ генераторов сложной энергосистемы на основе применения генетического алгоритма и методов модального анализа : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2009. 24 с.
28. Булатов Ю.Н. Методика согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов электростанций : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2012. 22 с.
29. Булатов Ю.Н., Попик В.А. Решение оптимизационных задач электроэнергетики с помощью адаптивного генетического алгоритма // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2012. Т.2. С. 94–99.
30. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Применение вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации // Науч. вестн. Новосибир. гос. техн. ун-та. 2016. № 2. Т. 63. С. 7–22.
31. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Применение генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 2. С. 30–45.
32. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Методика согласованной настройки систем АРВ и АРЧВ генератора // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2009. Т.1. С. 3–7.
33. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг Применение алгоритмов согласованной настройки регуляторов турбогенераторов установки распределенной генерации // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 2. С. 130–139.
34. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг Автоматические регуляторы для установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3 (23). С. 108–116.
35. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг Улучшение качества электроэнергии нетяговых потребителей путем применения автоматически управляемых установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 73–79.
36. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг Согласованная настройка регуляторов установок распределенной генерации, работающих в системе электроснабжения железной дороги // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 1 (25). С. 94–102.
37. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Сетевые кластеры в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск :Изд-во ИргУПС, 2015. 205 с.
38. Воропай Н.И., Этингов П.В. Развитие методов адаптации нечетких АРВ для повышения динамической устойчивости сложных электроэнергетических систем // Электричество. 2003. № 11. С. 2–10.
39. Булатов Ю.Н., Приходько М.А. Методика построения оптимизированной нечеткой модели электроэнергетической системы // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2011. Т. 1. С. 10–16.
40. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг Нечеткие регуляторы для ветрогенерирующих установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. №7-8. С. 60–69.
41. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Интеллектуальные регуляторы для установок распределенной генерации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2 (46). С. 83–95.
42. Аксеновский А.В., Булатов Ю.Н. Идентификация электроэнергетических систем для адаптивного управления автоматическими регуляторами возбуждения // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2011. Т. 1. – С. 44–48.
43. Игнатъев И.В., Приходько М.А, Булатов Ю.Н. Разработка и программная реализация алгоритма нечеткой нейросетевой идентификации параметров синхронного генератора // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 4 (16). С. 52–56.
44. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Мультиагентная система управления установками распределенной генерации // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. №11-12. С.97–107.
45. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Хуан Прогностические регуляторы для установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 1 (29). С. 63–69.
46. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Хуан Определение параметров прогностических регуляторов для установок распределенной генерации систем электроснабжения железных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 2 (30). С. 84–91.
47. Масленников В.А. Программное обеспечение для расчетов колебательной статической устойчивости энергосистем // Изв. вузов: Энергетика. 1995. № 3-4. С. 33–38.
48. Темгеновская Т.В. Выбор настроек АРВ-СД в многомашинной электроэнергетической системе // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2015. Т. 1. С. 105–109.
49. Темгеновская Т.В. Построение линейно-аппроксимированной области устойчивости для оперативного управления настроечными параметрами АРВ-СД ЭЭС // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 9–14.
50. Темгеновская Т.В. Поиск настроечных параметров регуляторов электроэнергетической системы // Труды Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2010. Т. 2. С. 77–18.

REFERENCES

1. Goryunov Yu.P., Shcherbachev O.V. Programma dlya rascheta staticheskoy ustoichivosti slozhnykh elektricheskikh sistem [Program for calculating the static stability of complex electrical systems]. *Trudy LPI [Proceedings of LPI]*, 1967, No. 291, pp. 98–103.
2. Lukashov E.S., Bushuev V.V. O strukturnykh skhemakh i chastotnykh kharakteristikakh elektricheskikh system [On structural schemes and frequency characteristics of electrical systems]. *Izv. SO AN SSSR. Ser.: Tekhn. nauk. [Izv. SB AS USSR]*, 1968, No.8, pp. 3–10.



3. Venikov V.A., Vasin V.P. Analiz staticheskoi ustoichivosti slozhnykh elektricheskikh sistem i chastotnye metody [Analysis of the Static Stability of Complex Electrical Systems and Frequency Methods]. *Tr. SibNIE [Proceedings of Siberian Research Institute of Energy]*, Novosibirsk, 1972, Issue 21, pp. 3–8.
4. Stroev V.A., Karasev E.D. Voprosy postroeniya ratsional'nogo algoritma rascheta oblastei staticheskoi ustoichivosti elektroenergeticheskikh sistem [Questions of constructing a rational algorithm for calculating the regions of static stability of electric power systems]. *Izv. RAN SSSR [Review of RAS USSR]*, Energetika i transport Publ., 1979, No. 3, pp. 37–45.
5. Goryunov Yu.P., Levinshstein M.V., Shcherbachev O.V. Metodika opredeleniya optimal'nykh parametrov regulirovaniya v slozhnykh linearizovannykh sistemakh s neskol'kimi reguliruemymi ob'ektami [A Method for Determining Optimal Control Parameters in Complex Linearized Systems with Several Controlled Objects]. *Tr. Leningr. politekh. in-ta [Proceed. of Leningr. Polytechn. Univ.]*, 1968, No. 293, pp. 67–70.
6. Goryunov Yu.P. Kompleks programm dlya issledovaniya staticheskoi ustoichivosti po samoraskachivaniyu slozhnykh elektricheskikh sistem [A set of programs for the study of static stability by self-oscillation of complex electrical systems]. *Modelirovanie elektroenergeticheskikh sistem : tez. dokl. Vsesoyuzn. nauchn. konf. [Modeling of electric power systems: abstracts of All-Union Scientific Conf.]*, Baku, 1982, pp. 221–222.
7. Zhenenko G.N. et al. Algoritm chislennoi optimizatsii parametrov ARV generatorov slozhnoi elektroenergeticheskoi sistemy [Algorithm for numerical optimization of the parameters of ARV generators of a complex electric power system]. *Tr. Leningr. politekh. in-ta [Proceed. of Leningr. Polytechn. Univ.]*, 1982, No. 385, pp. 16–21.
8. Gruzdev I.A., Ekimova M.M. Osnovnye zadachi issledovaniya sil'nogo regulirovaniya vzbuzhdeniya generatorov slozhnykh elektroenergeticheskikh sistem [The main problems of the study of strong regulation of excitation of generators of complex electric power systems]. *Trudy Leningr. politekh. in-ta [Proceed. of Leningr. Polytechn. Univ.]*, 1982, No. 385, pp. 3–12.
9. Simonova K.Zh., Stroev V.A. Voprosy vybora parametrov ARV v slozhnykh elektroenergeticheskikh sistemakh [Questions of choosing the parameters of ARV in complex electric power systems]. *Izv. RAN SSSR [Review of RAS USSR]*, Energetika i transport Publ., 1987, No.5, pp. 61–71.
10. Gruzdev I.A., Ustinov S.M., Ladvischenko B.G., Yurganov A.A. Koordinatsiya nastroek ARV-SD generatorov slozhnykh elektroenergeticheskikh sistem [Coordination of settings of ARV-SD generators for complex electric power systems]. *Voprosy ustoichivosti slozhnykh elektricheskikh sistem : sb. nauchn. tr. in-ta Energoset'-proekt [Problems of stability of complex electrical systems: coll. book of scholarly works of Energoset'proekt Inst.]*, Moscow: Energoset'proekt Publ., 1985, pp. 205–213.
11. Zekkel' A.S. Otsenka kachestva regulirovaniya i metodika nastroiки stabilizatsii ARV generatorov [Evaluation of the quality of regulation and methods for adjusting the stabilization of AER generators]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1988, No. 5, pp. 15–21.
12. Doinikov A.N., Kosintseva E.V. Sintez sistemy avtomaticheskogo upravleniya s ispol'zovaniem krivykh D-razbieniya [Synthesis of an automatic control system using D-decomposition curves]. *Tr. Brat. gos. un-ta: Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki - razvitiyu regionov Sibiri [Proc. of Bratsk State University: Ser.: Natural and engineering sciences for the development of the regions of Siberia]*, Vol. 1. Bratsk: BrGU Publ., 2008, 229 p.
13. Ignat'ev I.V., P'yannikov E.D. Metodika postroeniya trekhmernoi parametricheskoi oblasti D-razbieniya [A technique for constructing a three-dimensional parametric domain of a D-decomposition]. *Tr. Brat. gos. un-ta: Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki - razvitiyu regionov Sibiri [Proc. of Bratsk State University: Ser.: Natural and engineering sciences for the development of the regions of Siberia]*, Vol.1. Bratsk: BrGU, 2008, 229 p.
14. Doinikov A.N., Ignat'ev I.V. Algoritm operativnogo vybora nastroek ARV sil'nogo deistviya [Algorithm for prompt selection of adaptive AER settings]. *Trudy LPI [Proceedings of LPI]*, 1984, No. 399, pp. 27–31.
15. Yu.P. Goryunov et al. Kompleks programm dlya issledovaniya vozmushchennogo dvizheniya slozhnykh EES i algoritmov adaptatsii regulyatorov vzbuzhdeniya [A set of programs for studying the disturbed motion of complex EPS and the adaptation algorithms of excitation regulators]. *Trudy LPI [Proceedings of LPI]*, 1988, No. 427, pp. 16–25.
16. Gruzdev I.A. et al. Metodika koordinatsii nastroek ARV-SD v energosistemakh na osnove eksperimental'nykh dannykh [Methodology for coordination of AER-A settings in power systems based on experimental data]. *Trudy LPI [Proceedings of LPI]*, 1988, No. 427, pp. 55–61.
17. Bulatov Yu.N., D'yakonitsa S.A. Algoritm neparametricheskoi identifikatsii EES dlya polucheniya optimal'nykh koeffitsientov stabilizatsii ARV generatorov [Algorithm of nonparametric identification of EPS for obtaining optimal stabilization coefficients of AER generators]. *Trudy Brat. gos. un-ta. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki [Proceedings of Bratsk state un-ty. Ser.: Natural and engineering sciences]*, 2009, Vol. 1, pp. 7–11.
18. Bulatov Yu.N., Ignat'ev I.V. Opredelenie optimal'nykh koeffitsientov stabilizatsii sistem ARV i ARChV po neparametricheskim modelyam turbogeneratorov elektrostantsii [Determination of optimal stabilization coefficients for AER and AFRC systems using nonparametric models of turbine generators of power plants]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2009, No. 3, pp. 70–74.
19. Bulatov Yu.N., Ignat'ev I.V. Programmnyi kompleks dlya identifikatsii elektroenergeticheskikh sistem i optimizatsii koeffitsientov stabilizatsii avtomaticheskikh regulyatorov vzbuzhdeniya [Program complex for identification of electric power systems and optimization of stabilization coefficients of automatic excitation regulators]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2010, No. 4 (8), pp. 106–113.
20. Ignat'ev I.V., Kovrov A.E. Algoritm vybora nastroek avtomaticheskikh regulyatorov vzbuzhdeniya v mnogomashinnykh energosistemakh [Algorithm for choosing the settings of automatic excitation regulators in multi-machine power systems]. *Vestnik Sibir. gos. aerokosmich. un-ta im. akad. M.F. Reshetneva [Bulletin of Reshetnev Sibir. State Aerospace University]*, 2010, No. 1 (27), pp. 24–29.
21. Ignat'ev I.V., Bulatov Yu.N. Modeli i metody nastroiки sistem regulirovaniya vzbuzhdeniya generatorov na osnove eksperimental'nykh dannykh [Models and methods for tuning excitation control systems for generators based on experimental data]. Bratsk: BrGU Publ., 2016, 278 p.
22. Gol'dshtein I.M. et al. Metodika eksperimental'nogo opredeleniya oblastei kolebatel'noi ustoichivosti i krivykh ravnogo kachestva regulirovaniya [Technique of experimental determination of regions of oscillatory stability and curves of equal quality of regulation]. *Trudy LPI [Proceedings of LPI]*, 1984, No. 399, pp. 32–36.
23. Gol'dshtein I.M. et al. Algoritm i programma dlya otsenki effektivnosti upravleniya vzbuzhdeniem generatorov energoob'edineniya [Algorithm and program for evaluating the efficiency of controlling the excitation of power pool generators].: *sb. nauch. tr. [A collected book of scholarly works]*. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1987, pp. 99–105.



24. Yurganov A.A. Metody i sredstva avtomaticheskogo regulirovaniya vzbuzhdeniya turbo- i gidrogeneratorov [Methods and means of automatic regulation of the excitation of turbo and hydrogenerators]. *Tvorcheskoe nasledie akademika M.P. Kostenko i ego znachenie dlya sovremennogo i perspektivnogo elektromashinostroeniya [The creative heritage of Academician M.P. Kostenko and its importance for modern and future electric machine building]*. St. Petersburg: Nauka Publ., 1992, pp. 132–158.
25. Yurganov A.A., Kozhevnikov V.A. Regulirovanie vzbuzhdeniya sinkhronnykh generatorov [Regulation of excitation of synchronous generators]. St. Petersburg: Nauka Publ., 1996, 138 p.
26. Bulatov Yu.N., Ignat'ev I.V. Nastroyka ARV-SD generatora metodom standartnykh koeffitsientov s primeneniem geneticheskogo algoritma [Adjustment of AER-A generators by the method of standard coefficients using the genetic algorithm]. *Trudy Brat. gos. un-ta. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki [Proceedings of Bratsk state un-ty. Ser.: Natural and engineering sciences]*, 2008, Vol.1, pp. 18–24.
27. Sorokin D.V. Vybor nastroyek ARV generatorov slozhnoi energosistemy na osnove primeneniya geneticheskogo algoritma i metodov modal'nogo analiza: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Selection of AER generators for a complex power system based on the application of the genetic algorithm and modal analysis methods. Author's abstract of Ph.D. (Engineering) thesis]. St. Petersburg, 2009, 24 p.
28. Bulatov Yu.N. Metodika soglasovannoi nastroyki avtomaticheskikh regulyatorov vzbuzhdeniya i chastoty vrashcheniya generatorov elektrostantsii: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [The method of coordinated setting of automatic excitation regulators and the speed of generators of power plants. Author's abstract of Ph.D. (Engineering) thesis]. Irkutsk, 2012, 22 p.
29. Bulatov Yu.N., Popik V.A. Reshenie optimizatsionnykh zadach elektroenergetiki s pomoshch'yu adaptivnogo geneticheskogo algoritma [Solution of optimization problems of electric power industry with the help of adaptive genetic algorithm]. *Trudy Brat. gos. un-ta. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki [Proceedings of Bratsk state un-ty. Ser.: Natural and engineering sciences]*, 2012, Vol.2, pp. 94–99.
30. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Primenenie veivlet-preobrazovaniya i geneticheskikh algoritmov dlya nastroyki avtomaticheskikh regulyatorov ustanovok raspredelennoi generatsii [Application of wavelet transform and genetic algorithms for tuning of automatic regulators of distributed generation plants]. *Nauch. vestn. Novosibir. gos. tekhn. un-ta [Scientific bulletin of Novosibirsk state tech. un-ty]*, 2016, No. 2, Vol. 63, pp. 7–22.
31. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Primenenie geneticheskikh algoritmov dlya nastroyki avtomaticheskikh regulyatorov ustanovok raspredelennoi generatsii [Application of genetic algorithms for tuning automatic regulators of distributed generation units]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and Mathematical Technologies in Science and Management]*, 2016, No. 2, pp. 30–45.
32. Bulatov Yu.N., Ignat'ev I.V. Metodika soglasovannoi nastroyki sistem ARV i ARChV generator [The technique of coordinated tuning of AER and AFRC generator systems]. *Trudy Brat. gos. un-ta. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki [Proceedings of Bratsk state un-ty. Ser.: Natural and engineering sciences]*, 2009, Vol.1, pp. 3–7.
33. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Primenenie algoritmov soglasovannoi nastroyki regulyatorov turbogeneratorov ustanovki raspredelennoi generatsii [Application of algorithms for coordinated tuning of regulators of turbine generators of a distributed generation plant]. *Trudy Brat. gos. un-ta. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki [Proceedings of Bratsk state un-ty. Ser.: Natural and engineering sciences]*, 2014, Vol. 2, pp. 130–139.
34. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Avtomaticheskie regulatory dlya ustanovok raspredelennoi generatsii [Automatic regulators for distributed generation units]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2014, No. 3 (23), pp. 108–116.
35. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Uluchshenie kachestva elektroenergii netyagovykh potrebitel'nykh putem primeneniya avtomaticheskii upravlyaemykh ustanovok raspredelennoi generatsii [Improving the quality of electricity for non-tiring consumers by applying automatically controlled distributed generation units]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2014, No. 4 (24), pp. 73–79.
36. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Soglasovannaya nastroyka regulyatorov ustanovok raspredelennoi generatsii, rabotayushchikh v sisteme elektrosnabzheniya zheleznoi dorogi [The coordinated adjustment of the regulators of the distributed generation units operating in the power supply system of the railway]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2015, No. 1 (25), pp. 94–102.
37. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Setevye klasteri v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Network clusters in railways power supply systems]. Irkutsk: ISTU Publ., 2015, 205 p.
38. Voropai N.I., Etingov P.V. Razvitiye metodov adaptatsii nechetkikh ARV dlya povysheniya dinamicheskoi ustoychivosti slozhnykh elektroenergeticheskikh sistem [Development of methods for adapting fuzzy AER to improve the dynamic stability of complex electric power systems]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 2003. No. 11, pp. 2–10.
39. Bulatov Yu.N., Prikhod'ko M.A. Metodika postroyeniya optimizirovannoi nechetkoi modeli elektroenergeticheskoi sistemy [The technique of constructing an optimized fuzzy model of the electric power system]. *Trudy Brat. gos. un-ta. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki [Proceedings of Bratsk state un-ty. Ser.: Natural and engineering sciences]*, 2011, Vol. 1, pp. 10–16.
40. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Nechetkie regulatory dlya vetrogeneriruyushchikh ustanovok [Fuzzy regulators for wind power plants]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki []*, 2014. No.7-8, pp. 60–69.
41. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Intellektual'nye regulatory dlya ustanovok raspredelennoi generatsii [Intellectual regulators for distributed generation plants]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2015, No. 2 (46), pp. 83–95.
42. Aksenovskii A.V., Bulatov Yu.N. Identifikatsiya elektroenergeticheskikh sistem dlya adaptivnogo upravleniya avtomaticheskimi regulyatorami vzbuzhdeniya [Identification of electric power systems for adaptive control of automatic excitation regulators]. *Trudy Brat. gos. un-ta. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki [Proceedings of Bratsk state un-ty. Ser.: Natural and engineering sciences]*, 2011, Vol. 1, pp. 44–48.
43. Ignat'ev I.V., Prikhod'ko M.A., Bulatov Yu.N. Razrabotka i programmnaya realizatsiya algoritma nechetkoi neirosetevoi identifikatsii parametrov sinkhronnogo generatora [Development and software implementation of the algorithm for fuzzy neural network identification of the parameters of a synchronous generator]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2012, No. 4 (16), pp. 52–56.
44. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Mul'tiagentnaya sistema upravleniya ustanovkami raspredelennoi generatsii [Multiagent control system for distributed generation units]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki [Bulletin of Higher Education Institutions. Problems of energy]*, 2015, No.11-12, pp. 97–107.
45. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen Van Khuan. Prognosticheskie regulatory dlya ustanovok raspredelennoi generatsii [Prognostic regulators for distributed generation units]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2016, No. 1 (29), pp. 63–69.



46. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen Van Khuan. Opredelenie parametrov prognosticheskikh regulyatorov dlya ustanovok raspredelennoi generatsii sistem elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog [Determination of the parameters of prognostic regulators for installations of distributed generation of railway power supply systems]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2016, No. 2 (30), pp. 84–91.

47. Maslennikov V.A. Programmnoe obespechenie dlya raschetov kolebatel'noi staticheskoi ustoichivosti energosistem [Software for calculating the oscillatory static stability of power systems.]. *Izv. vuzov: Energetika* [Proceedings of higher education institutions: Power generation], 1995, No. 3-4, pp. 33–38.

48. Temgenevskaya T.V. Vybore nastroek ARV-SD v mnogomashinnoi elektroenergeticheskoi sisteme [Selection of AER-A settings in a multi-machine power system]. *Trudy Brat. gos. un-ta. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of Bratsk state un-ty. Ser.: Natural and engineering sciences], 2015, Vol. 1, pp. 105–109.

49. Temgenevskaya T.V. Postroenie lineino-approksimirovannoi oblasti ustoichivosti dlya operativnogo upravleniya nastrochnymi parametrami ARV-SD EES [Construction of linearly approximated stability region for operational control of tuning parameters of AER-A power plants]. *Trudy Brat. gos. un-ta. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of Bratsk state un-ty. Ser.: Natural and engineering sciences], 2012, Vol. 1, pp. 9–14.

50. Temgenevskaya T.V. Poisk nastrochnykh parametrov regulyatorov elektroenergeticheskoi sistemy [Search for tuning parameters of regulators of the electric power system]. *Trudy Brat. gos. un-ta. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of Bratsk state un-ty. Ser.: Natural and engineering sciences], 2010. Vol. 2, pp. 77–18.

УДК 519.688

DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).94-101

Краковский Юрий Мечеславович,

д. т. н., профессор кафедры «Информационные системы и защита информации»,

Иркутский государственный университет путей сообщения,

e-mail: kum@stranzit.ru

Лузгин Александр Николаевич,

к. т. н., преподаватель кафедры «Информационные технологии»,

Иркутский государственный университет,

e-mail: alexln@mail.ru

Y. M. Krakovsky,

Doctor of Engineering Science, Prof. at the Subdepartment of

Systems of Information and Information Protection,

Irkutsk State Transport University,

e-mail: kum@stranzit.ru

A. N. Luzgin,

Ph.D. in Engineering Science,

Member of the Subdepartment of Information Technology,

Irkutsk State University

Информация о статье

Дата поступления: 14 июня 2017 г.

Article info

Received: Jun 14, 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ АНСАМБЛЕЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ ИНТЕРВАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

A STUDY OF MODERN METHODS OF FORECASTING ENSEMBLES CONSTRUCTION AS APPLIED TO THE INTERVAL FORECASTING PROBLEM

Аннотация. В настоящее время исследователи уделяют много внимания разработке и совершенствованию методов машинного обучения для решения различных прикладных задач. Одной из таких немаловажных задач является задача прогнозирования динамических показателей с целью повышения эффективности принятия управленческих решений в условиях неопределённости. Несомненно важной характеристикой любого метода прогнозирования является точность прогнозов. Одним из наиболее перспективных и современных направлений по улучшению точности прогнозирования является построение прогнозирующих ансамблей

В данной работе проведено исследование существующих методов построения прогнозирующих ансамблей с целью обоснования их использования для задачи интервального прогнозирования. Среди таких методов были рассмотрены: метод голосования, метода бустинга, метод стеккинга, метод бэггинга и метод случайных подпространств. С учетом специфики построения и обучения моделей интервального прогнозирования были рекомендованы для применения метод стеккинга и метод бэггинга. Именно эти методы являются современными, перспективными и подходящими для разработанных авторами моделей интервального прогнозирования с целью улучшения точности прогнозов.

Ключевые слова: интервальное прогнозирование, динамические показатели, прогнозирующие ансамбли, бустинг, стеккинг, бэггинг, случайные подпространства.

Abstract. At present, scientists pay great attention to the development and improvement of machine training methods for solving various applied problems. One of such important tasks is the problem of dynamic indicators forecasting for the purpose of increasing the effectiveness of decision-making in the conditions of uncertainty. An undoubted and important characteristic of any forecasting method is the forecast accuracy. One of the most promising and modern trends in improving the forecasting accuracy is the construction of forecasting ensembles.

In this paper, the authors have carried out a study of existing methods for constructing forecasting ensembles in order to justify their use for the problem of interval forecasting. Among such methods, the voting method, the boosting method, the stacking method, the bagging method and the random subspaces method have been considered. Taking into account the specifics of the construction and training of interval forecasting models, the stacking method and the bagging method have been recommended for application. These methods are considered modern, promising and suitable for the interval forecasting models developed by the authors in order to improve the forecasting accuracy.

Keywords: interval forecasting, dynamic indicators, forecasting ensembles, boosting, stacking, bagging, random subspaces.