

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (05.14.02)

УДК 621.311.1

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-11-18

Методика построения интегральных показателей комплексной оценки свойств узлов электроэнергетических систем

Н.Ш. Чемборисова, И.Д. Черненко

Исследована проблема выбора узлов управления электроэнергетической системы (ЭЭС). Воздействие на эти узлы позволяет с максимальной эффективностью решать задачи надежного обеспечения потребителей электроэнергией необходимого качества.

В качестве примера рассмотрен фрагмент математической модели электроэнергетической системы, используемой в режимном тренажере диспетчера «Финист», в виде сложно разветвленной электрической сети из одиннадцати узлов напряжением 110 кВ, трех узлов 220 кВ, имеющих связь с системой, и двух генераторных узлов.

Предложена новая методика принятия решения по выбору узлов управления с учетом совокупности разнотипных показателей с разными единицами и шкалами измерения и масштабами. Данные показатели характеризуют следующие свойства узлов электроэнергетической системы: долю потребления реактивной мощности в узле, чувствительность напряжения к изменению реактивной нагрузки, число присоединенных линий электропередачи, статистические показатели изменения напряжения в узлах и перетоков реактивной мощности при различных вариантах установки устройств ее компенсации.

Для совместного использования отмеченных показателей выполнено их ранжирование по эффективности установки устройств компенсации реактивной мощности в системе. Для каждого показателя задана шкала из 5 рангов (интервалов), определяющих предпочтения (качественные суждения) исследователя в оценке эффективности установки устройств компенсации реактивной мощности в узлах системы. Высший ранг (5) соответствует максимальной эффективности, низший (1) — минимальной. Для вычисления индивидуального (интегрального) показателя приоритетности установки устройств компенсации реактивной мощности ранги показателей складываются, а их сумма делится на произведение числа рангов и числа используемых показателей (признаков). По результатам расчета определяется рейтинг (место) каждого узла и выбираются узлы для установки устройств компенсации реактивной мощности по степени их влияния на обеспечение надежности функционирования ЭЭС, потери активной мощности в сети и регулирование напряжения.

Таким образом, представлена новая методика определения интегральных показателей для комплексной оценки свойств узлов сложной электроэнергетической системы и выбора узлов управления с использованием системы различных показателей. Они характеризуют исследуемые узлы по эффективности установки устройств компенсации реактивной мощности с целью снижения потерь активной мощности в сети, регулирования напряжения и обеспечения режимной надежности ЭЭС. Достоверность полученных результатов подтверждена их сравнением с показателями метода сальдо-проводимостей, хорошо зарекомендовавшего себя в задачах определения узлов управления режимами ЭЭС.

Ключевые слова: свойства узлов, шкалы измерения, интегральный показатель, ранжирование.

Для цитирования: Чемборисова Н.Ш., Черненко И.Д. Методика построения интегральных показателей комплексной оценки свойств узлов электроэнергетических систем // Вестник МЭИ. 2021. № 3. С. 11—18. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-11-18.

A Procedure of Drawing up Integral Indicators for Comprehensively Estimating the Properties of Electric Power System Nodes

N.Sh. Chemborisova, I.D. Chernenkov

The problem of selecting the electric power system control nodes is studied. By performing control of these nodes, matters concerned with providing reliable power supply of the required quality to consumers can be settled in the most efficient manner.

As an example, a fragment of the electric power system mathematical model used in the Finist mode-setting simulator for a power system dispatch control center operator is considered, which represents a highly branched electrical network consisting of eleven 110 kV nodes, three 220 kV nodes connected with the system, and two generator nodes.

A new procedure for selecting the control nodes is proposed, which takes into account a combination of different indicators having different measurement units, dimensions and scales is proposed. These indicators characterize the following properties of power system nodes: the reactive power fraction absorbed at a node, the sensitivity of voltage to reactive load variations, the number of connected power lines, and statistical indicators characterizing the change of voltage at the nodes and reactive power flows for different options of installing the reactive power compensation devices.

For combined use of these indicators, they were ranked according to the efficiency of installing reactive power compensation devices in the system. For each indicator, a scale of five ranks (intervals) is set, which determine the preferences (qualitative judgments) of the researcher in evaluating the reactive power compensation devices installation efficiency at the system nodes. The highest rank (5) corresponds to the maximum efficiency, and the lowest rank (1) corresponds to the minimum efficiency. To calculate the individual (integral) priority indicator of installing reactive power compensation devices, the ranks of indicators are added together, and their sum is divided by the product of the number of ranks by the number of the used indicators (features). Based on the calculation results, the rating (location) of each node is determined, and the nodes for installing the reactive power compensation devices are selected according to their effect on ensuring the electric power system operation reliability, active power losses in the network, and voltage regulation.

Thus, a new procedure is presented for determining the integral indicators for comprehensively estimating the properties of complex electric power system nodes and selecting the controlled nodes using a system of various indicators. These indicators characterize the studied nodes in terms of the efficiency of installing reactive power compensation devices to reduce active power losses in the network, voltage regulation, and ensuring the electric power system operational reliability. The validity of the results obtained in the study is confirmed by their comparison with the indicators of the balance-conductivity method, which has proven itself in solving problems connected with determining the nodes for controlling electric power system operation modes.

Key words: node properties, measurement scales, integral indicator, ranking.

For citation: Chemborisova N.Sh., Chernenkov I.D. A Procedure of Drawing up Integral Indicators for Comprehensively Estimating the Properties of Electric Power System Nodes. Bulletin of MPEI. 2021;3:11—18. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-11-18.

Введение

Современные электроэнергетические системы (ЭЭС) — сложные технические объекты для производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии. Для их проектирования, расчета и анализа режимов, выбора на их основе управляющих воздействий разработан достаточно трудоемкий в реализации математический аппарат [1 — 6]. В связи с этим актуальна проблема поиска новых простых подходов и решений по выбору узлов управления, воздействие на параметры которых позволяет с максимальной эффективностью решать задачи надежного обеспечения потребителей электроэнергией необходимого качества [7]. Подобные подходы также применяют при организации предварительного обучения диспетчеров навыкам быстрой оценки, складывающейся в ЭЭС схемно-режимной ситуации.

Представляет интерес принятие решения по эффективному выбору узлов управления для установки устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ), которое следует проводить с учетом разных свойств и характеристик узлов исследуемой системы. Эти свойства характеризуют не только сам узел, но и степень влияния установки в нем УКРМ на параметры других узлов, а также режим системы в целом. Следо-

вательно, участвующие в исследовании данные имеют разные масштабы, единицы и шкалы измерения. Наиболее подходящим для их совместного анализа представляется метод анализа иерархий. Следует отметить, что общая теория аналогичных решений изложена в [8, 9], где отмечается преимущество метода анализа иерархий для решения многокритериальных задач по сравнению с подходом, основанным на линейной логике. Метод анализа иерархий — свод простых правил для анализа сложных задач с использованием опыта и знаний исследователя [8 — 16].

Таким образом, предметом построения иерархической структуры является выбор узлов управления, в которых установка устройств компенсации реактивной мощности наиболее целесообразна. В качестве критериев для выбора наилучшего решения примем:

- эффективность регулирования напряжения;
- обеспечение режимной надежности системы;
- оптимизацию потерь активной мощности в исследуемой сети.

Для оценки критериев используем характеристики изучаемой системы и свойства ее узлов:

- долю потребления реактивной мощности в узле $\Delta Q_{\text{н}}$, %;
- коэффициент чувствительности напряжения к изменению реактивной нагрузки $K_{\text{н}}$, $\Delta U/U_{\text{н}}$, %МВАр;

- число высоковольтных линий (ВЛ), присоединенных к конкретному узлу, N , шт.;
- среднее значение напряжения в узлах после установки УКРМ U_{cp} , кВ;
- средний относительный прирост напряжения в узлах после установки УКРМ $\Delta U_{cp}/U_n$, %;
- относительное значение среднеквадратического отклонения напряжения σ_{U_n} ;
- превышение относительно потока реактивной мощности в сети от номинального $(Q_n - Q_n)/Q_n$, о.е.

Первый показатель — доля потребления реактивной мощности в узле характеризует значимость (вес) данного узла нагрузки в энергосистеме и, косвенно, определяет его преимущество в системе предпочтений разного свойства.

Коэффициент чувствительности напряжения узла к изменению реактивной нагрузки выглядит как отношение величины отклонения напряжения в процентах от номинального значения при изменении нагрузки на один МВАр мощности и выражает степень его жесткости (сенсорности), что существенно влияет на нагрузочную способность, надежность, эффективность регулирования параметров режима, величину токов короткого замыкания (КЗ) и иные показатели [18 — 20].

Число ВЛ, присоединенных к узлу (связей между узлами), также считается косвенным показателем его нагрузочной способности и одновременно характеризует надежность электроснабжения потребителей.

Среднее значение напряжения во всех узлах исследуемой системы после установки УКРМ в конкретном узле означает эффективность данного мероприятия в сочетании с показателями вариации напряжения — среднеквадратическим отклонением и средним относительным его приростом, что характеризует показатель качества электроэнергии. Определять статистические показатели напряжения можно в именованных или относительных единицах при номинальном базисном значении напряжения. Чем больше среднее значение напряжения и меньше среднеквадратическое отклонение, тем выше эффективность установки УКРМ в рассматриваемом узле по влиянию на напряжение в других узлах системы. Следует добавить, что величина напряжения в узле существенно влияет на все важнейшие показатели режима работы ЭЭС: пропускную способность линий электропередачи, статическую и динамическую устойчивость ЭЭС и устойчивость узлов нагрузки, т. е. на надежность электроснабжения потребителей.

Показатель превышения суммарного потока реактивной мощности в ВЛ 110 кВ и 220 кВ по отношению к полной реактивной мощности нагрузки исследуемой системы при установке УКРМ в разных ее узлах служит для косвенной оценки эффективности УКРМ в плане возможности снижения потерь активной мощности.

Рассмотрим описанные характеристики и свойства в методике эффективной расстановки УКРМ с учетом различных влияющих факторов на примере сложной разветвленной сети с большим числом замкнутых контуров и источников энергии. Поскольку была отмечена рациональность использования методики для обучения диспетчеров, то для примера на рисунке приведена схема фрагмента математической модели достаточно распространенной «типовой» электроэнергетической системы, применяемой в режимном тренажере диспетчера «Финист» [17].

В предложенный фрагмент входит сложно разветвленная электрическая сеть напряжением 110 и 220 кВ. В нее поступает электрическая энергия от двух электрических станций ТЭЦ и ГРЭС разной мощности, также имеются связи по линиям 220 кВ с внешней системой, от которой идет почти половина требуемой электрической энергии. В схеме представлено 11 узлов напряжением 110 кВ, 3 узла 220 кВ со связями с системой и 2 генераторных узла. Рассмотрен режим наибольших нагрузок, в котором неравномерно распределенная по узлам системы включенная активная мощность электроустановок потребителей составляет 1070 МВт (реактивная — 406 МВАр). Данная нагрузка характерна для крупного промышленного района, когда половина энергии поступает от местных электростанций, а остальная часть — от внешней энергосистемы.

Для компенсации части реактивной мощности в сети проанализируем влияние установки УКРМ мощностью 200 МВАр (2 по 100 МВАр) в каждом из исследуемых узлов 110 кВ на параметры режима системы. Учтем, что секции шин 110 кВ в нормальном режиме работают со включенными шиносоединительными выключателями. Это увеличивает токи КЗ не выше допустимых пределов, выравнивает уровни напряжения и улучшает распределение энергии. Во всех режимах реактивная мощность, генерируемая ВЛ 110 и 220 кВ, компенсирует потери реактивной мощности в сети.

Следует отметить, что программное обеспечение тренажера «Финист» рассчитывает и визуально отображает параметры режима (напряжения в узлах и потоки активной и реактивной мощностей) изучаемой модели ЭЭС при допустимых изменениях в схеме и исходных данных. Это существенно упрощает расчеты. В столбцах табл. 1 приведены данные по распределению напряжения в узлах исследуемой системы в результате последовательной установки УКРМ в девяти узлах 110 кВ. Первый столбец результатов расчета характеризует исходное состояние системы при дефиците реактивной мощности в ее узлах. Последующие демонстрируют эффект по изменению напряжения во всех узлах системы при установке УКРМ в соответствующих узлах. При анализе данных табл. 1 видно, что эффект различен и недостаточен для детального анализа, поэтому выполним статистический анализ влияния УКРМ на напряжение в узлах с использовани-

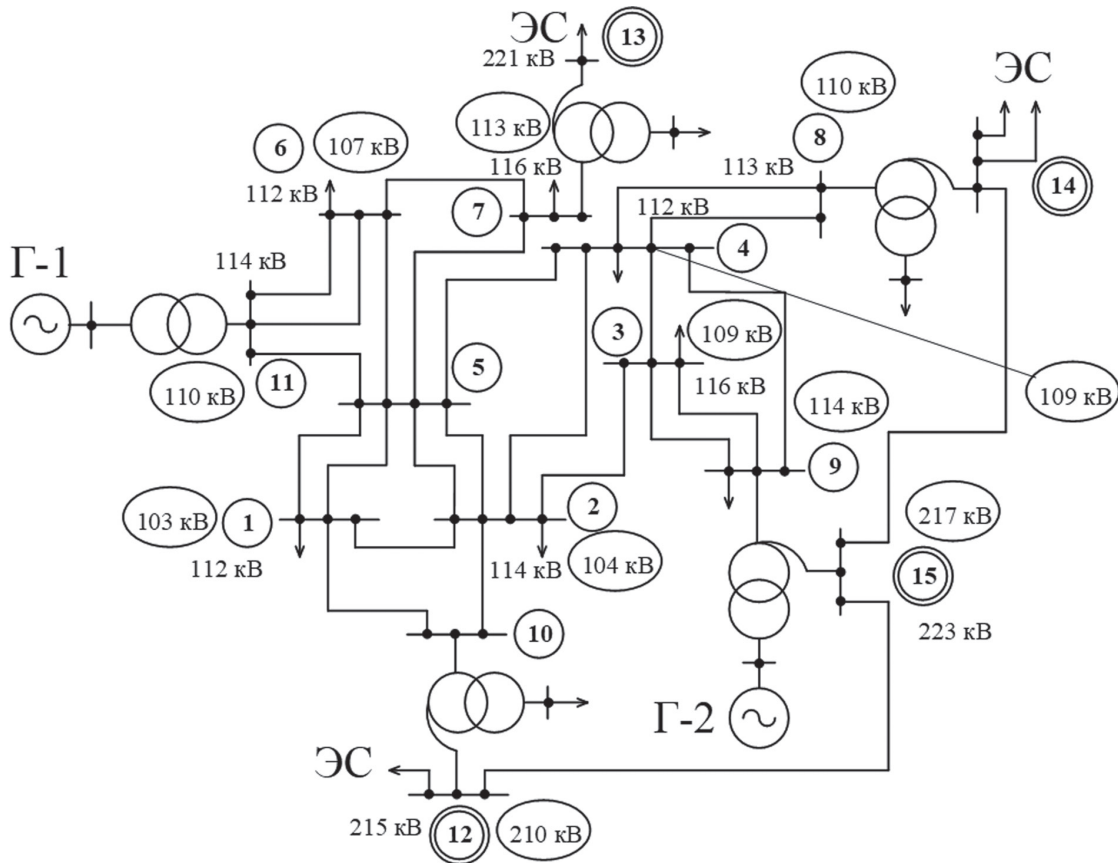


Схема исследуемого фрагмента сети 220 (⊙) и 110 (○) кВ

Таблица 1

Влияние установки УКРМ на напряжение в узлах системы

Номер узла	Номер варианта									
	7	1	2	3	4	5	6	8	10	
1	103	114	110	107	107	110	107	106	109	
2	104	110	114	109	109	110	107	107	109	
3	109	113	115	120	114	113	111	112	113	
4	107	111	112	111	115	111	109	111	110	
5	105	111	111	108	109	113	109	107	109	
6	107	111	111	109	110	112	119	108	110	
7	113	115	115	114	114	115	115	114	114	
8	110	111	111	111	112	111	110	117	110	
9	114	118	118	120	118	117	116	116	114	
10	104	110	110	108	108	109	107	106	114	

ем числовых характеристик. Результаты оценки показателей (см. табл. 1), характеризующих свойства узлов исследуемой системы, представлены в табл. 2.

Фактически данная совокупность показателей является некоторой абстракцией структуры исследуемой системы для изучения их воздействий на ее элементы (узлы) и систему в целом. При определении приоритетов и ранжировании узлов ЭЭС по каждому элемен-

ту табл. 2 можно было бы применить метод попарных сравнений [7, 8]. Однако, для упрощения воспользуемся методом их шкалирования [15, 16]. В таблице 3 для каждого показателя задана шкала из пяти рангов и интервалов, определяющих предпочтения (качественные суждения) в оценке эффективности установки УКРМ в узлах системы. Высший ранг (5) соответствует максимальной эффективности, низший (1) — минимальной.

Таблица 2

Численные значения показателей, характеризующие исследуемые узлы по эффективности установки УКРМ

Номер узла	Оцениваемый показатель						
	$\Delta Q_n, \%$	$K_n, \Delta U/U_n \%/MVAp$	$N, шт$	$U_{cp}, кВ$	$\Delta U_{cp}/U_n, \%$	$\sigma_{U/U_n}, \%$	$(Q_n - Q_n)/Q_n, о. е.$
1	8,90	0,051	4	112,8	5,0	2,41	0,23
2	13,3	0,038	6	112,7	5,3	2,40	0,04
3	4,90	0,056	4	111,5	4,2	4,57	0,26
4	4,90	0,039	6	111,5	4,2	3,39	0,23
5	13,3	0,036	8	112,2	5,1	2,36	0,05
6	8,90	0,067	4	111,4	4,1	4,30	0,59
7	4,90	0,041	6	107,4	3,5	3,56	0,08
8	16,3	0,050	2	110,3	3,1	3,98	0,17
10	12,3	0,049	2	111,2	3,9	2,20	0,11

Таблица 3

Ранжирование показателей узлов 110 кВ по эффективности установки УКРМ

Тип показателя	Ранги и интервалы				
	5	4	3	2	1
$\Delta Q_n, \%$	>20	[20...15)	[15...10)	[10...5]	<5
$K_n, \Delta U/U_n \%/MVAp$	<0,03	[0,03...0,04)	[0,04...0,05)	[0,05...0,06]	>0,06
$N, шт$	>8	(8...6]	(6...4]	(4...2]	<2
$U_{cp}, кВ$	[118...115)	[115...112)	[112...111)	[111...110]	<110
ΔU_{cp} в процентах от $U_{ном}$	>5	[5...)	[4...3)	[3...2]	<2
σ_U в процентах от $U_{ном}$	<2	[2...3)	[3...4)	[4...5]	>5
$(Q_n - Q_n)/Q_n, \%$	<5	[5...10)	[10...15)	[15...20]	>20

Таблица 4

Ранги индивидуальных показателей узлов 110 кВ по эффективности установки УКРМ

Показатели	Номер узла									
	1	2	3	4	5	6	7	8	10	
$\Delta Q_n, \%$	2	3	1	1	3	2	4	4	3	
$K_n, \Delta U/U_n \%/MVAp$	2	4	2	4	4	1	3	2	3	
$N, шт$	3	4	3	4	5	3	4	2	2	
$U_{cp}, кВ$	4	4	3	3	4	3	1	2	3	
$\Delta U_{cp}/U_n, \%$	4	5	4	4	5	4	3	3	3	
$\sigma_{U/U_n}, \%$	4	4	2	3	4	2	3	3	4	
$(Q_n - Q_n)/Q_n, о. е.$	1	5	1	1	5	1	4	2	3	
Интергральный показатель J_y	0,57	0,83	0,46	0,57	0,86	0,46	0,63	0,51	0,6	
Рейтинг	5...6	2	8...9	5...6	1	8...9	3	7	4	

Отметим, что выбор числа рангов, ширины интервалов и самих показателей субъективен и зависит от квалификации и предпочтений исследователя.

Используя данные табл. 2, 3, вычислим ранги индивидуальных показателей узлов 110 кВ по эффективности установки в них УКРМ.

Заключительный этап методики состоит в установлении индивидуального интегрального показателя

приоритетности установки УКРМ в рассматриваемых узлах. При одинаковом весе каждого показателя строки складываются, и сумма делится на произведение чисел рангов и показателей (признаков). Максимально возможное значение индивидуального показателя — 1, минимальное — 0,2. По результатам расчета в табл. 4 показан рейтинг (место) каждого узла по приоритетности установки УКРМ. Высшим рейтингом обладают

Таблица 5

узлы 2 и 5, а остальные имеют более низкие значения интегрального показателя. В целом, наилучший результат по суммарной потребности нагрузки в реактивной мощности (406 МВАр) получился при установке УКРМ по 200 МВАр в узлах 2 и 5. В этом случае потери активной мощности в рассматриваемой системе минимальны (2,3%).

Для сравнения полученных результатов с показателями, применяемыми для определения узлов управления другими методами, рассчитаны значения сальдо-проводимостей изучаемых узлов (табл. 5).

Суть метода состоит в достаточно простой и легко реализуемой методике оценки разности между мнимыми составляющими собственной и суммы взаимных проводимостей узлов схемы исследуемой ЭЭС [21, 22]. Минимальные по модулю значения указывают на высокую степень чувствительности (сенсорности) напряжения узла к изменению его мощности, большие — на его «жесткость», что требуется при оценке надежности. Методом регрессионного анализа установлено, что между показателями сальдо-проводимостей и интегральными значениями узлов имеется заметная линейная стохастическая связь с коэффициентом корреляции $r = 0,79$. Это, с одной стороны, подтверждает достоверность полученных результатов, а с другой — показывает эффективность метода сальдо-проводимостей, хорошо зарекомендовавшего себя в задачах определения узлов управления режимом ЭЭС [18 — 22]. Поскольку возможности последнего метода основаны на базовых понятиях ТОЭ и оценены на сложных схемах мегаполисов и их областей (Московской и Ленинградской энергосистем), то дополнительная верификация приведенной на рисунке расчетной схемы, используемой для диспетчерского тренажера, не проводилась. Следует отметить, что использование метода сальдо-проводимостей оправдано при предварительной оценке списка узлов управления, который затем уточняется с использованием метода анализа иерархий.

Литература

1. **Идельчик В.И.** Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. **Войтов О.Н. и др.** Анализ неоднородностей электроэнергетических систем. Новосибирск: Наука, 1999.
3. **Справочник** по проектированию электрических сетей. М: ЭНАС; 2012.
4. **Кудрин В.И.** История компенсации реактивной мощности: комментарий главного редактора // Электрика. 2011. № 6. С. 26—29.
5. **Сафарян В.С.** Структурный анализ потоков и потерь мощности в электрических цепях // Известия НАН РА и ГИУА. Серия «Технические науки». 2001. Т. 54. № 1. С. 52—57.
6. **Conti S., Raiti S., Vagliasindi G.** Voltage Sensitivity Analysis in Radial MV Distribution Networks Using Cons-

Комплексные показатели исследуемых узлов

Номер узла	Оцениваемый показатель	
	интегральный J_y	сальдо-проводимости ΔY , мк·См
1	0,57	574
2	0,83	997
3	0,46	460
4	0,57	847
5	0,86	1142
6	0,46	390

Заключение

Предложена новая методика принятия решения по выбору узлов управления для установки устройств компенсации реактивной мощности с учетом разных свойств и характеристик узлов и влияния на параметры режима системы.

Ранжирование узлов по эффективности установки УКРМ выполнено с использованием интегрального показателя, объединившего разноименные характеристики узлов по степени их влияния на обеспечение надежности функционирования ЭЭС, регулирование напряжения и потери активной мощности в сети.

Достоверность полученных результатов расчетов на фрагменте математической модели сложной электроэнергетической системы, используемой в режиме тренажера диспетчера «Финист», подтверждена их сравнением с показателями метода сальдо-проводимостей, хорошо зарекомендовавшего себя в задачах определения узлов управления режимом ЭЭС.

Метод сальдо-проводимостей использован для экспресс-анализа мест установки компенсирующих устройств до проведения расчета режима, а метод анализа иерархий — для уточненных расчетов.

References

1. **Idel'chik V.I.** Raschety i Optimizatsiya Rezhimov Elektricheskikh Setey i Sistem. M.: Energoatomizdat, 1988. (in Russian).
2. **Voytov O.N. i dr.** Analiz Neodnorodnostey Elektroenergeticheskikh Sistem. Novosibirsk: Nauka, 1999. (in Russian).
3. **Spravochnik** po Proektirovaniyu Elektricheskikh Setey. M: ENAS; 2012. (in Russian).
4. **Kudrin V.I.** Istoriya Kompensatsii Reaktivnoy Moshchnosti: Kommentariy Glavnogo Redaktora. Elektriika. 2011;6:26—29. (in Russian).
5. **Safaryan V.S.** Strukturnyy Analiz Potokov i Poter' Moshchnosti v Elektricheskikh Tsepyakh. Izvestiya NAN RA i GIUA. Seriya «Tekhnicheskie Nauki». 2001;54;1:52—57. (in Russian).
6. **Conti S., Raiti S., Vagliasindi G.** Voltage Sensitivity Analysis in Radial MV Distribution Networks Using Cons-

tant Current Models // Proc. Intern. Symp. Industrial Electronics. 2010. Pp. 2548—2554.

7. **ГОСТ 32144—2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

8. **Саати Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий. М. Радио и связь, 1993.

9. **Саати Т., Керис К.** Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991.

10. **Saaty T.L.** Concepts, Theory and Techniques: Rank Generation, Preservation and Reversal in the Analytic Hierarchy Process // Decision Sci. 1987. V. 18. Pp. 157—177.

11. **Saaty T.L., Vargas L.C.** Inconsistency and Rank Preservation // J. Math. Psychology. 1984. V. 28. No. 2. Pp. 205—241.

12. **Белкин А.Р.** Желательные свойства оптимальных линейных упорядочений // Известия АН СССР. Серия «Техническая кибернетика». 1987. № 2. С. 3—21.

13. **Подиновский В.В., Ногин В.Д.** Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982.

14. **Калмыков С.А., Шокин Ю.И., Юлдашев З.Х.** Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1986.

15. **Фархатзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Абдуллаева С.А.** Совершенствование методов повышения надежности объектов электроэнергетических систем // Электричество. 2016. № 8. С. 18—28.

16. **Фархатзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Исмаилова С.М.** Методы и алгоритмы сравнения и ранжирования надежности и экономичности работы объектов электроэнергетических систем // Электричество. 2017. № 8. С. 4—13.

17. **Режимный тренажер диспетчера «Финист»** [Электрон. ресурс] www.monitel.ru/download/Finist.pdf (дата обращения 25.11.2020).

18. **Фролов О.В., Чемборисова Н.Ш.** Предварительный анализ параметров сети для расстановки устройств ограничения токов короткого замыкания в сетях мегаполисов // Электричество. 2012. № 8. С. 26—30.

19. **Фролов О.В., Чемборисова Н.Ш., Мулиц Н.С.** Формализованная установка устройств управления режимами в сетях мегаполисов // Электричество. 2012. № 5. С. 5—9.

20. **Баранов И.Л., Чемборисова Н.Ш.** Определение чувствительности узлов электроэнергетических систем на основной частоте и высших гармониках // Электричество. 2013. № 8. С. 15—20.

21. **Чемборисова Н.Ш., Фролов О.В., Баранов И.Л., Баширов И.Н.** Использование обобщенных показателей схемы при анализе режимов электроэнергетических систем // Вестник МЭИ. 2015. № 1. С. 66—73.

22. **Чемборисова Н.Ш.** Учет жесткости узлов при оценке надежности функционирования ЭЭС // Энергетика, информатика, инновации — 2019: Сб. Тр. IX Международ. науч.-техн. конф. 2019. Т. 1. С. 54—57.

tant Current Models. Proc. Intern. Symp. Industrial Electronics. 2010:2548—2554.

7. **GOST 32144—2013.** Elektricheskaya Energiya. Sovmestimos' Tekhnicheskikh Sredstv Elektromagnitnaya. Normy Kachestva Elektricheskoy Energii v Sistemakh Elektrosnabzheniya Obshchego Naznacheniya. (in Russian).

8. **Saati T.** Prinyatie Resheniy. Metod Analiza Ierarkhiy. M. Radio i Svyaz', 1993. (in Russian).

9. **Saati T., Keris K.** Analiticheskoe Planirovanie. Organizatsiya Sistem. M.: Radio i Svyaz', 1991. (in Russian).

10. **Saaty T.L.** Concepts, Theory and Techniques: Rank Generation, Preservation and Reversal in the Analytic Hierarchy Process. Decision Sci. 1987;18:157—177.

11. **Saaty T.L., Vargas L.C.** Inconsistency and Rank Preservation. J. Math. Psychology. 1984;28;2:205—241.

12. **Belkin A.R.** Zhelatel'nye Svoystva Optimal'nykh Lineynykh Uporyadocheniy. Izvestiya AN SSSR. Seriya «Tekhnicheskaya Kibernetika». 1987;2;S. 3—21.

13. **Podinovskiy V.V., Nogin V.D.** Pareto-optimal'nye Resheniya Mnogokriterial'nykh Zadach. M.: Nauka, 1982. (in Russian).

14. **Kalmykov S.A., Shokin Yu.I., Yuldashev Z.X.** Metody Interval'nogo Analiza. Novosibirsk: Nauka, 1986. (in Russian).

15. **Farkhatzade E.M., Muradaliev A.Z., Farzaliev Yu.Z., Abdullaeva S.A.** Sovershenstvovanie Metodov Povysheniya Nadezhnosti Ob'ektov Elektroenergeticheskikh Sistem. Elektrichestvo. 2016;8:18—28. (in Russian).

16. **Farkhatzade E.M., Muradaliev A.Z., Farzaliev Yu.Z., Ismailova S.M.** Metody i Algoritmy Sravneniya i Ranzhirovaniya Nadezhnosti i Ekonomichnosti Raboty Ob'ektov Elektroenergeticheskikh Sistem. Elektrichestvo. 2017;8:4—13. (in Russian).

17. **Rezhimnyy Trenazher** Dispetchera «Finist» [Elektron. Resurs] www.monitel.ru/download/Finist.pdf (Data Obrashcheniya 25.11.2020). (in Russian).

18. **Frolov O.V., Chemborisova N.Sh.** Predvaritel'nyy Analiz Parametrov Seti dlya Rasstanovki Ustroystv Ogranicheniya Tokov Korotkogo Zamykaniya v Setyakh Megapolisov. Elektrichestvo. 2012;8:26—30. (in Russian).

19. **Frolov O.V., Chemborisova N.Sh., Mulits N.S.** Formalizovannaya Ustanovka Ustroystv Upravleniya Rezhimami v Setyakh Megapolisov. Elektrichestvo. 2012;5:5—9. (in Russian).

20. **Baranov I.L., Chemborisova N.Sh.** Opredelenie Chuvstvitel'nosti Uzlov Elektroenergeticheskikh Sistem na Osnovnoy Chastote i Vysshikh Garmonikakh. Elektrichestvo. 2013;8:15—20. (in Russian).

21. **Chemborisova N.Sh., Frolov O.V., Baranov I.L., Bashirov I.N.** Ispol'zovanie Obobshchennykh Pokazateley Skhemy pri Analize Rezhimov Elektroenergeticheskikh Sistem. Vestnik MEI. 2015;1:66—73. (in Russian).

22. **Chemborisova N.Sh.** Uchet Zhestkosti Uzlov pri Otsenke Nadezhnosti Funktsionirovaniya EES. Energetika, Informatika, Innovatsii — 2019: Sb. Tr. IX Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. 2019;1:54—57. (in Russian).

Сведения об авторах:

Чемборисова Наиля Шавкатовна — доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: Nelya1998@mail.ru

Черненко Иван Дмитриевич — аспирант кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: idchernenkov@yandex.ru

Information about authors:

Chemborisova Nailia Sh. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Power Electrical Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: Nelya1998@mail.ru

Chernenkov Ivan D. — Ph.D.-student of Power Electrical Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: idchernenkov@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 12.09.2020

The article received to the editor: 12.09.2020