

УДК 621.311.21

МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ (РАСПОЗНАНИЯ) АВАРИЙНЫХ КАСКАДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

И. З. ШАХМАЕВ¹, Б. М. ГАЙСИН²

¹i.shakhmaev@gmail.com, ²GB9688@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 03.11.2017

Аннотация. В связи с регулярно возникающими каскадными авариями в электроэнергетических системах (ЭС) актуальной представляется задача создания инструмента, направленного на повышение живучести ЭС. В данном исследовании на примере разработанной 25 узловой схемы ЭС для заданных схемно-режимных условий показано возможное возникновение и развитие каскадной аварии. При этом экспериментально показано влияние неоднородности параметров ЭС на возникновение и развитие каскадного процесса. Предложена методика выявления, распознавания угрозы возможного возникновения аварийных каскадных процессов в неоднородных динамических системах типа ЭС. Дано определение неоднородности для динамических систем, подобных ЭС. Предложен способ визуального представления неоднородной поверхности факторов, влияющих на аварийные каскадные процессы в ЭС. Разработанная методика позволяет определять возможность возникновения и развития аварийного каскадного процесса на каждом шаге ведения режима, а также при рассмотрении проекта развития ЭС принимать эффективные управленческие решения по недопущению крупных системных аварий.

Ключевые слова: живучесть электроэнергетических систем; каскадный аварийный процесс в энергетических системах; масштабные отключения электроэнергии.

ВВЕДЕНИЕ

Во всем мире в различных крупных энергоузлах, ЭС с «завидной» постоянностью происходит погашение большого объема потребителей в результате аварийных процессов различного вида. В Российской Федерации значительная часть аварий является авариями каскадного типа [1], что указывает на необходимость в разработке мер по их предотвращению.

Так, например, авария каскадного характера произошла 02.07.2016 г. в ЭС Республики Башкортостан (РБ) [2]. Авария привела к выделению на изолированную работу от единой энергетической системы (ЕЭС) России центральной части ЭС РБ с дефицитом мощности и работой автоматической частотной разгрузки (АЧР) в объеме поряд-

ка 600 МВт, а также отключением потребителей Челябинской и Оренбургской областей, с суммарной мощностью отключенных потребителей 1012,5 МВт. При нормативном первичном возмущении, в результате излишней работы релейной защиты, произошло отключение нескольких элементов сети 500 кВ. Следующая часть элементов электрической сети 500 кВ отключилась из-за неправильной работы противоаварийной автоматики, что привело к «набросу мощности» на линии электропередач, являющиеся резервными элементами доставки мощности в дефицитную часть ЭС по отношению к отключившимся элементам сети 500 кВ. Это привело сначала к отключению наиболее загруженных воздушных линий (ВЛ) автоматикой ограничения перегруза

оборудования (АОПО), а в более поздний период, когда в сети развились асинхронные режимы, к снижению частоты в выделенной части ЭС (работой АЧР) и соответствующим погашением потребителей.

Элементы каскадного развития имели и другие аварии, происходившие позже в РФ, в т.ч. в 2017 г.:

1. Авария в энергосистеме Пермского края [3], произошедшая 15.06.2017 г., приведшая к отделению на изолированную работу от ЕЭС России Пермско-Закамского энергоузла, с отключением генерирующего оборудования около 850 МВт и обесточением потребителей около 400 МВт.

2. Авария в объединенной энергосистеме (ОЭС) Сибири [4], произошедшая 27.06.2017 г., приведшая к отделению на изолированную работу от ЕЭС России Восточной части ОЭС Сибири в составе энергосистем Иркутской области, Республики Бурятия, Забайкальского края и части энергосистемы Красноярского края, с отключением генерирующего оборудования около 6700 МВт и обесточением потребителей около 4400 МВт. Можно отметить, что при этом произошло существенное снижение частоты на значительной части территории страны.

3. Авария в ОЭС Юга [5], произошедшая 28.07.2017 г., приведшая к отделению на изолированную работу от ЕЭС России энергорайона Республики Крым и г. Севастополь (за исключением Керченского энергоузла), с отключением генерирующего оборудования около 400 МВт, обесточением потребителей около 1000 МВт.

4. Авария в ОЭС Востока, произошедшая 01.08.2017 г., приведшая к разделению ОЭС Востока на две части: Амурскую и Хабаровскую ЭС и Приморскую ЭС с отключением генерирующего оборудования около 2200 МВт, с обесточением потребителей около 1200 МВт.

Таким образом, можно констатировать, что методические указания по устойчивости [6], являющиеся сегодня основой противоаварийного управления в ЭС, не работают в плане предотвращения каскадных процессов.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

В предлагаемой здесь модели каскадного процесса [1] отключение одного элемента влечет за собой отключение следующего элемента (элементов). В этой модели каскадный процесс может начинаться задолго до лавинных явлений и продолжается до тех пор, пока отключение каждого следующего элемента приводит к отключению последующего. Если последующее отключение не происходит, то каскадный процесс прекращается. Каскадный процесс не обязательно заканчивается аварией с потерей устойчивости. Возможность существования каскадных процессов в ЭС определяет их живучесть [7].

В модели [1] принято, что токовая нагрузка элемента энергосистемы выше допустимой приводит к его разрушению (отключению). Тогда необходимым условием существования каскадного процесса является неравенство

$$I_{ji} + \Delta I_{ji} > I_{\text{доп}ji}, \quad (1)$$

которое должно выполняться на каждом следующем шаге аварийного отключения. Здесь ΔI_{ji} – наброс тока на перегружаемый элемент, $I_{\text{доп}ji}$ – допустимое значение тока для этого элемента. Невыполнение неравенства (1) приводит к останову аварийного каскадного процесса [1, 8–11].

Для выявления условий осуществления каскадных процессов или для распознавания существования таких условий разработана методика выявления (распознавания) каскадных процессов. Данная методика рассматривает ЭС как географически распределенную динамическую систему. Формализованная (используя любой подходящий аппарат формализации) до матричного типа (с матрицей A размером $i \times j$) схема энергосистемы применяется как координатное поле для выявления неоднородности параметров, влияющих на формирование условий осуществления каскадных процессов. Пример такой ЭС с пошаговым развитием каскадного аварийного процесса (отключение с 1 по 7 элементов ЭС) приведен на рис. 1.

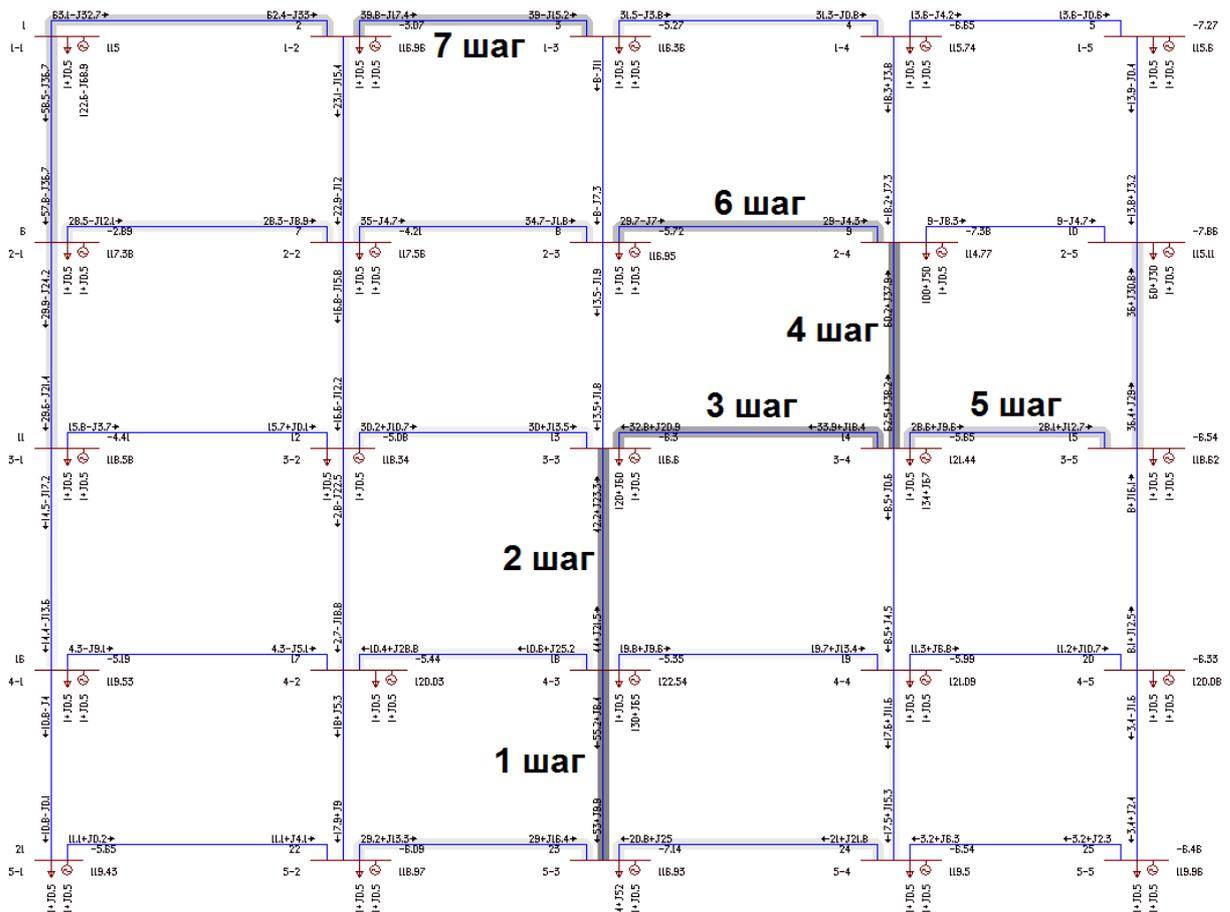


Рис. 1. Расчетная схема объединенной энергосистемы

Выбираются факторы A_{ij} , наиболее влияющие на осуществление каскадных процессов. Каждый фактор A_{ij} распределяется в соответствии с матричной формализацией ЭС на двумерной плоскости схемы ЭС по координатам $i \times j$.

Для приведенного примера на рис. 1 факторами, влияющими на возникновение и развитие аварийных каскадных процессов в неоднородных ЭС [8–11], приняты: индуктивное сопротивление X_{ij} , генерируемая $P_{ij \text{ ген}}$ и потребляемая $P_{ij \text{ наг}}$ в узлах ЭС мощность. В зависимости от типа задач, решаемых в динамических системах (в т.ч. ЭС), влияющими факторами могут быть различные параметры.

Для формирования неоднородной поверхности влияющего фактора A_{ij} по двумерной плоскости элементов ЭС определяется максимальная величина его распределения A_{ij}^{\max} .

Определяются значения относительных величин влияющих факторов, в общем случае:

$$A_{ij}^* = \frac{A_{ij}}{A_{ij}^{\max}},$$

где A_{ij}^* – значение влияющего фактора в относительных единицах; A_{ij} – текущее значение влияющего фактора рассматриваемой ЭС; A_{ij}^{\max} – максимальное значение влияющего фактора A из всего ряда параметров A_{ij} рассматриваемой ЭС.

Применительно к рассматриваемой ЭС (рис. 1) расчет для влияющих факторов X_{ij} ,

$P_{ij \text{ ген}}$, $P_{ij \text{ наг}}$ выполняется аналогично:

$$X_{ij}^* = \frac{X_{ij}}{X_{ij}^{\max}}, \quad P_{ij \text{ ген}}^* = \frac{P_{ij \text{ ген}}}{P_{ij \text{ ген}}^{\max}}, \quad P_{ij \text{ наг}}^* = \frac{P_{ij \text{ наг}}}{P_{ij \text{ наг}}^{\max}},$$

где X_{ij}^* , $P_{ij \text{ ген}}^*$, $P_{ij \text{ наг}}^*$ – значение влияющего фактора в относительных единицах; X_{ij} , $P_{ij \text{ ген}}$, $P_{ij \text{ наг}}$ – текущее значение влияющего фактора рассматриваемой ЭС; X_{ij}^{\max} , $P_{ij \text{ ген}}^{\max}$, $P_{ij \text{ наг}}^{\max}$ – максимальное значение влияющего фактора из всего ряда

параметров X_{ij} , $P_{ij \text{ ген}}$, $P_{ij \text{ наг}}$ соответственно в рассматриваемой ЭС.

Параметры неоднородной поверхности, определяющей осуществимость формирования каскадных процессов на двухмерной плоскости матричной формализации схемы ЭС, определяются при равноценности влияния для всех влияющих факторов их алгебраическим сложением по соответствующим координатам:

$$N_{ij}^* = A_{ij}^* + B_{ij}^* + \dots + C_{ij}^*$$

В общем случае для учета различия влияния влияющих факторов вводятся весовые коэффициенты:

$$N_{ij}^* = k_A A_{ij}^* + k_B B_{ij}^* + \dots + k_C C_{ij}^*$$

где k весовой коэффициент участия в диапазоне от 0 до 1.

Таким образом, неоднородность определяется как покоординатное распределение алгебраической суммы факторов динамической системы, влияющих на осуществление исследуемого процесса, по соответствующей N -мерной поверхности формализованной динамической системы.

Применительно к рассматриваемой ЭС для влияющих факторов X_{ij}^* , $P_{ij \text{ ген}}^*$, $P_{ij \text{ наг}}^*$:

$$N_{ij}^* = X_{ij}^* + P_{ij \text{ ген}}^* + P_{ij \text{ наг}}^* \quad (2)$$

Далее строится поверхность изменения влияющих факторов в координатах x , y , z , где координаты x , y соответствуют координатам $i \times j$ матричной формализации схемы ЭС на двухмерной плоскости, а по координате z распределяется значение влияющего фактора A_{ij}^* о.е.

На рис. 2 визуальное представлена неоднородная поверхность параметра индуктивного сопротивления X_{ij}^* о.е. ветвей рассматриваемой ЭС (рис. 1). При этом для наглядности к цифровой шкале на оси z привязана цветовая шкала.

На рис. 3 и 4 соответственно визуальное представлены неоднородные поверхности параметров генерируемой и потребляемой в узлах ЭС мощности в о.е.

На рис. 5 визуальное представлена неоднородная поверхность до триггерного возмущения в ЭС, полученная путем алгебраического суммирования по формуле (2) основных влияющих факторов X_{ij}^* , $P_{ij \text{ ген}}^*$, $P_{ij \text{ наг}}^*$ о.е.

Визуально неоднородная поверхность после применения возмущения в ЭС представлена на рис. 6, она получена путем алгебраического суммирования по формуле (2) основных влияющих факторов.

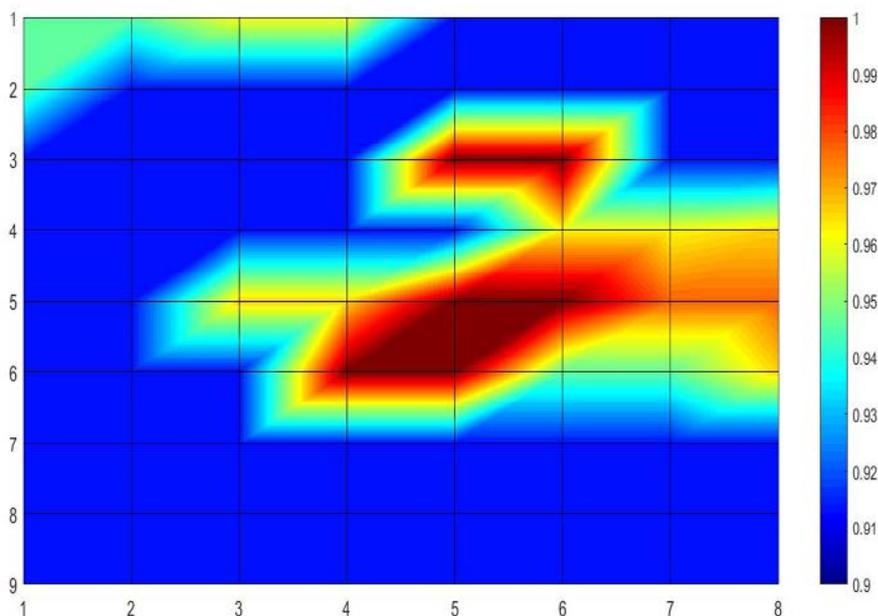


Рис. 2. Визуальное представление неоднородной поверхности параметра X_{ij}^* о.е.

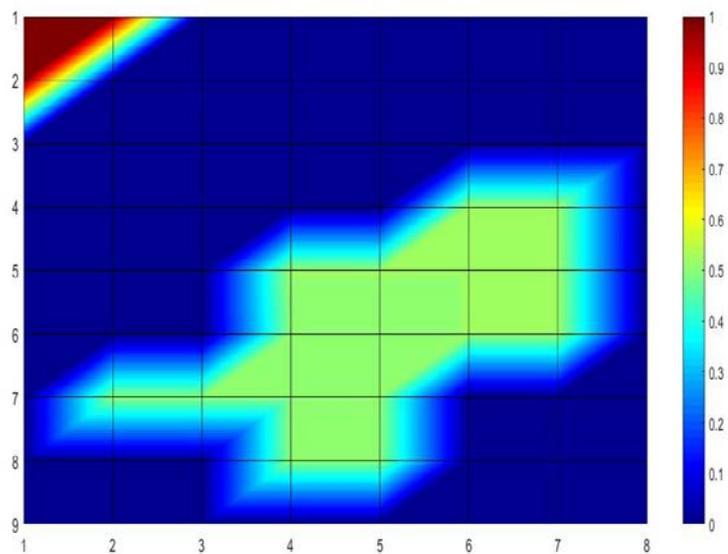


Рис. 3. Визуальное представление неоднородной поверхности параметра генерируемой в энергоузлах мощности $P_{ij}^* \text{ ген}$ о.е.

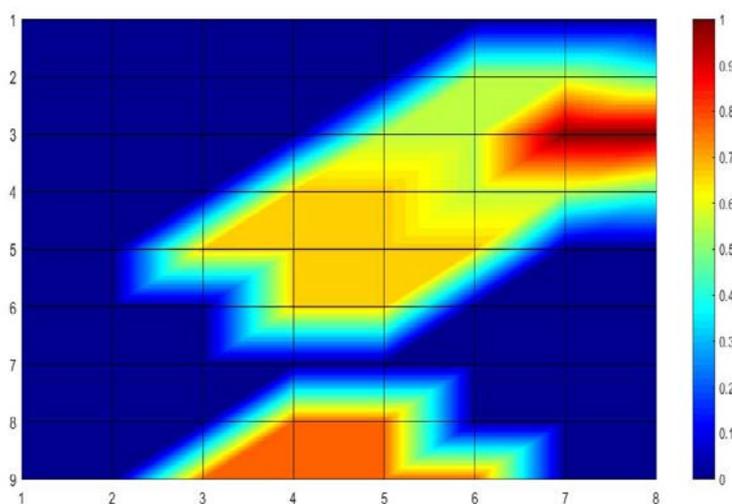


Рис. 4. Визуальное представление неоднородной поверхности параметра потребляемой в энергоузлах мощности $P_{ij}^* \text{ наг}$ о.е.

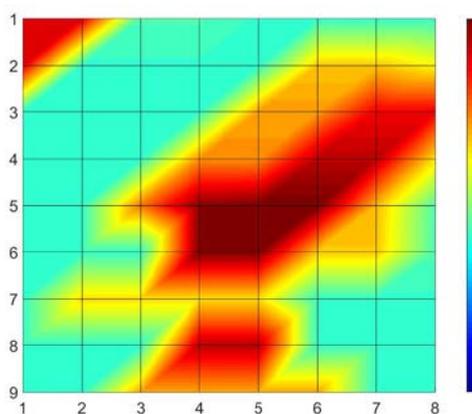


Рис. 5. Неоднородная поверхность совокупности параметров X_{ij}^* , $P_{ij}^* \text{ ген}$, $P_{ij}^* \text{ наг}$ о.е. до возмущения

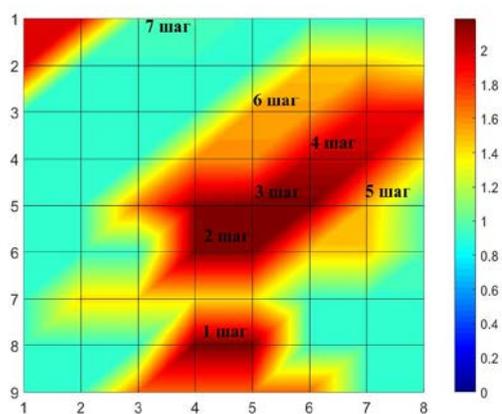


Рис. 6. Неоднородная поверхность совокупности параметров X_{ij}^* , $P_{ij}^* \text{ ген}$, $P_{ij}^* \text{ наг}$ о.е. после возмущения

На рис. 6 в момент времени t_1 произошло триггерное возмущение (1 шаг каскадного процесса), обусловленное увеличением потребляемой мощности в узле 23 со значения $52 + j26$ МВА до $72 + j36$ МВА, что соответствует увеличению P_{ij}^* с 1,86 [о.е.] до 2,31 [о.е.], величина возмущения составила 0,45 [о.е.]. Это привело к перегрузу по току ветви 18–23. В данном случае параметры ветви 18–23 представлены маркой провода АС-70/11 с параметрами: $R = 10$ Ом, $X = 10,13$ Ом, $B = -255 \cdot 10^{-6}$, $I_{\text{доп}} = 265$ А. В ветви 18–23 отношение протекающего тока к допустимому составляет $I/I_{\text{доп}} = 1,02$, что указывает на превышение длительно допустимого значения (1), при этом данная ветвь выводится из схемы.

Представленная на рис. 6 неоднородная поверхность совокупности влияющих факторов ЭС по характеру впадин определяет траекторию – «русло» возникновения и развития пошагового аварийного каскадного процесса, траектория развития которого по элементам ЭС соответствует траектории, обозначенной на схеме рис. 1.

Таким образом, для распознавания траектории протекания каскадного процесса в ЭС

необходимо определить распределение влияющих факторов на оси z в координатной плоскости x и y , соответствующих координатам $i \times j$ матричной формализации схемы ЭС на двухмерной плоскости.

На рис. 7 представлена поверхность (после триггерного возмущения), показывающая величины токов I_{ij}^* о.е. в элементах ЭС при пошаговом развитии аварийного каскадного процесса (на первом шаге - отключение ветви 18–23 в результате перегруза по току) в соответствии с условием (1).

В табл. 1 представлены величины токов в ветвях пошагово развивающегося аварийного каскадного процесса, где $I_{\text{доп}}$ – допустимый расчетный ток в ветви ЭС, $I_{\text{н.у.}}$ – начальные условия тока в ветви до возникновения и развития аварийного каскадного процесса в ЭС.

Таким образом, описанная методика позволяет определять возможность возникновения и развития аварийного каскадного процесса на каждом шаге ведения режима, а также при рассмотрении проекта развития ЭС принимать эффективные управленческие решения [8, 11–13] по недопущению крупных системных аварий каскадного характера.

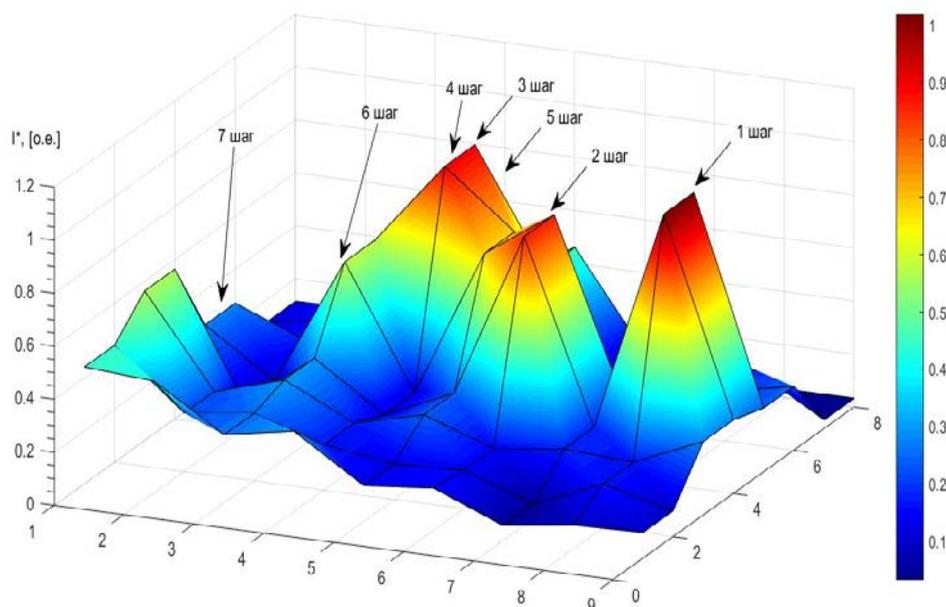


Рис. 7. Визуальное представление поверхности неоднородной загруженности по току I_{ij}^* ветвей ЭС после триггерного возмущения

Таблица 1

Токи (I, A) отключаемых ветвей в ходе развития аварийного каскадного процесса в ЭС

Ветви	$I_{н.у.} (A)$	1 шаг	2 шаг	3 шаг	4 шаг	5 шаг	6 шаг	7 шаг
18–23, $I_{доп} \leq 265A$	157	269	–	–	–	–	–	–
13–18, $I_{доп} \leq 265A$	226	236	278	–	–	–	–	–
13–14, $I_{доп} \leq 265A$	196	189	179	273	–	–	–	–
9–14, $I_{доп} \leq 390A$	319	356	357	369	472	–	–	–
14–15, $I_{доп} \leq 330A$	132	152	162	148	203	449	–	–
8–9, $I_{доп} \leq 265A$	81	158	162	142	161	183	270	–
2–3, $I_{доп} \leq 390A$	218	223	220	233	214	269	330	413

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика выявления, распознавания угрозы возможного возникновения и развития аварийных каскадных процессов в неоднородных динамических системах типа ЭС.

2. Дано определение неоднородности в динамических системах, подобных ЭС, для выявления (распознавания) возможности возникновения и развития аварий каскадного характера.

3. Предложен способ визуального и математического анализа неоднородной поверхности, построенной в соответствии с влияющими на аварийные каскадные процессы факторами в ЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахмаев И. З. О способах предотвращения каскадных процессов в энергосистемах // Вестник УГАТУ. Энергетика, электротехнические комплексы и системы. Т. 13. №1 (34). Уфа: УГАТУ, 2009. С. 176–179. [I. Z. Shahmaev, "About ways of prevention of cascade processes in power systems", in *Vestnik UGATU. Energetika elektrotekhnicheskkiye komplekxy i sistemy*, vol. 13, no. 1 (34), pp. 176-179, 2009.]

2. О восстановлении электроснабжения республики Башкортостан, челябинской и оренбургской области. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/5547>. (Дата обращения 15.10.17). [*About restoration of power supply of the republic of Bashkortostan, Chelyabinsk and Orenburg region* (2017, Okt. 15) [Online], (in Russian). Available: <https://minenergo.gov.ru/node/5547>. Date of circulation.]

3. О ситуации с энергоснабжением потребителей пермско-закамского энергоузла. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8452> (дата обращения 15.10.17). [*On the situation with energy supply to consumers of the Perm-Zakamsky energy center*, (2017, Okt. 15) [Online], (in Russian). Available: <https://minenergo.gov.ru/node/8452>]

4. О восстановлении электроснабжения в сибирском федеральном округе URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8538> (дата обращения 15.10.17). [*Restoration of electricity in the Siberian Federal District* (2017, Okt. 15) [Online], (in Russian). Available: <https://minenergo.gov.ru/node/8538>.]

5. Андрей Черезов провел совещание по вопросу нарушения электроснабжения потребителей в кубанской и крымской энергосистемах, произошедшего 28.07.2017. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8909> (дата обращения 15.10.17). [*Andrei Cherezov held a meeting on the issue of power supply disruption in the Kuban and Crimean energy systems, which occurred on July 28, 2012* (2017, Okt. 15) [Online], (in Russian). Available: <https://minenergo.gov.ru/node/8909>.]

6. Методические указания по устойчивости энергосистем. Утв. приказом Минэнерго РФ от 30.06.2003. № 277. *Methodical instructions on the stability of power systems. Approved. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of 30.06.2003. No. 277.*

7. Идельчик В. И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем М.: Энергоатомиздат, 1988, С. 592. [V. I. Idelchik, "Calculations and optimization of modes of electrical networks and systems" (in Russian) M.: Energoatomizdat, 1988, P. 592.]

8. Об учете влияния возможности возникновения каскадных процессов в электросети на проектирование схем выдачи мощности электростанций / Ф. Р. Исмагилов [и др.] // Вестник УГАТУ. Энергетика, электротехнические комплексы и системы. Т. 15. № 1(39). Уфа: УГАТУ, 2012. С. 176–179. [F.R. Ismagilov et. al. "On the account of the influence of the possibility of the emergence of cascade processes in the power grid on the design of power output schemes of power plants", in *Vestnik UGATU. Energetika elektrotekhnicheskkiye komplekxy i sistemy*, vol. 15, no. 1 (39), pp. 176-179, 2012.]

9. Влияние неоднородности параметров электроэнергетических систем на возникновение каскадных аварийных процессов / И. З. Шахмаев, [и др.] // Современные проблемы науки и техники. 2013. № 6 (50). [I. Z. Shakhmaev, et al., "Influence of heterogeneity of the parameters of electric power systems on the occurrence of cascade emergency processes", in *Modern problems of science and technology*, no. 6 (50), 2013.]

10. Шахмаев И. З., Гайсин Б. М. О развитии каскадных процессов в электротехнических и электроэнергетических комплексах // Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (ч. 9), С. 1871–1876. [I. Z. Shahmaev, B. M. Gaisin, "On the development of cascade processes in electrotechnical and electric power complexes", in *Fundamentalnye issledovaniya*, no. 2 (part 9), pp. 1871-1876, 2015.]

11. Shahmaev I. Z., Gaisin B. M., Shiryayev O. V. A new method of taking management decisions at designing and developing electric power systems // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). [I.Z. Shahmaev, B.M. Gaisin, O.V. Shiryayev

"A new method of taking management decisions at designing and developing electric power systems", in *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manu-facturing (ICIEAM)*.]

12. **Ismagilov F. R., Shahmaev I. Z., Gaisin B. M.** The technique to improve the effectiveness of control systems in inhomogeneous electric power grids // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) p. 1–5. [F. R. Ismagilov, I. Z. Shahmaev, B. M. Gaisin "The technique to improve the effectiveness of control systems in inhomogeneous electric power grids", in *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)* p. 1-5, 2017]

13. **Гайсин Б. М.** Способ принятия эффективных решений для повышения живучести при проектировании и развитии энергосистем // Вестник УГАТУ. Электротехника. Т. 21. № 3 (77). Уфа: УГАТУ, 2017. С. 47–53. [B. M. Gaisin, "A method of making effective decisions to increase survivability in the design and development of energy systems", in *Vestnik UGATU. Ehlektrotekhnika*, vol. 21, no 3 (77), pp. 47-53, 2017.]

ОБ АВТОРАХ

ШАХМАЕВ Ильдар Зуфарович, доц. каф. электромеханики. Дипл. инж. электроэнергет. (МЭИ, 1982). Канд. техн. наук по электротехн. компл. и системам. Иссл. в обл. электротехн. комплексов и систем. Иссл. в обл. повышения живучести динамических систем, а также предотвращения возможности возникновения и развития аварийных каскадных процессов в электроэнергетических системах и сетях.

ГАЙСИН Булат Маратович, асс. каф. электромеханики. Дипл. инж. по электроэнергетич. сист. и сетям (УГАТУ 2010). Иссл. в обл. повышения живучести динамических систем, предотвращения возможности возникновения и развития аварийных каскадных процессов в электроэнергетических системах и сетях, распределенной энергетики на базе солнечных электростанций.

METADATA

Title: Method of identification (recognition) of cascade accidents in electric power systems.

Authors: I. Z. Shahmaev¹, B. M. Gaisin²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹i.shakhmaev@gmail.com, ²gb9688@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 2 (80), pp. 97-104, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: In connection with the regular occurrence of cascade accidents in electric power systems (EPS), the task of creating a tool aimed at increasing the survivability of EPS is relevant. In this study, the possible emergence and development of a cascade accident is shown using the example of the developed twenty-five-node EPS scheme for the given circuit-mode conditions. At the same time, the effect of heterogeneity of EPS parameters on the appearance and development of the cascade process is experimentally demonstrated. A technique is proposed for the formation (recognition) of emergency cascade processes in inhomogeneous dynamic systems of the EPS type. The definition of heterogeneity in dynamic systems of similar EPS for the

formation (recognition) of accidents of a cascade character is given. A method for visual representation of an inhomogeneous surface influencing emergency cascade processes in EPS factors is proposed. The developed technique allows to determine the possibility of the emergence and development of an emergency cascade process at each step of the regime, and also when considering the EC development project to make effective management decisions to prevent major systemic accidents.

Key words: survivability of electric power systems; cascade process of energy systems; cascade accidents of power systems; blackout in electric power systems; power outage in electric power systems.

About authors:

SHAHMAEV, Ildar Zufarovich, Docent of electromechanics department. Diploma. Ing. power. (MPEI, 1982). PhD in Electrical Engineering. compl. and systems. Research in the region. electro-technical. complexes and systems. Issl. in the region. increase the living-honor of dynamic systems, as well as prevent the possibility of the emergence and development of emergency cascading processes in electric power systems and networks.

GAISIN, Bulat Maratovich, assistant of electromechanics department. Dipl. Ing. by elektroenergetich. syst. and grids (USATU, 2010). Research in the field of increasing survivability and preventing the occurrence and development of cascading emergency processes in electric power systems and networks.