



ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ НЕОДНОРОДНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ РЕГУЛИРОВАНИЕМ УРАВНИТЕЛЬНОЙ ЭДС

А.И. Мотовилов, И.И. Соловьев

Северный (Арктический) Федеральный Университет,
г. Архангельск, Россия
Alex.Motovilov@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Повышение пропускной способности электрической сети, которая характеризуется максимальной величиной мощности допустимой для передачи из одного района энергосистемы в другой. *Процесс* передачи электроэнергии сопровождается коммутациями и небалансами мощностей в узлах, приводящих к перегрузкам отдельных участков сети и аварийным отключениям. Для предотвращения перегрузок ограничивают объем передачи мощности по этим участкам, что является причиной снижения параметров надежности электроснабжения потребителей, эффективности использования энергетических ресурсов и системных аварий. На практике для снижения перегрузки элементов электрической сети используются традиционные способы: регулирование генерации в рассматриваемых энергоузлах, изменение топологии сети, а также, при недостаточной эффективности первых двух способов, ввод ограничений электроснабжения потребителей. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи использовалась компьютерная модель, созданная в ПК RastrWin3. В работе проведены исследования влияния на пропускную способность сети уравнивающей ЭДС между узлами электросети. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье показано, что регулирование уравнивающей ЭДС позволяет изменять величину максимальной допустимой мощности, передаваемой по электрической сети. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Результаты исследований могут быть использованы в практике диспетчерского управления при решении задач улучшения характеристик режимов работы, планирования и эксплуатации энергосистемы в режиме реального времени. Работоспособность предложенного алгоритма проверена экспериментально.

Ключевые слова: энергосистема; математическая модель; электроэнергетический режим; неоднородная электрическая сеть; уравнивающая ЭДС.

Для цитирования: Мотовилов А. И., Соловьев И. И. Повышение пропускной способности неоднородной электрической сети регулированием уравнивающей ЭДС // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 52-60. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-52-60.

INCREASING THE TRANSMISSION CAPACITY AN INHOMOGENEOUS ELECTRICAL NETWORK BY REGULATING THE EQUALIZING EMF

AI. Motovilov, II. Solovejev

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia
Alex.Motovilov@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consideration of issues related to the study of ways to increase the capacity of the electrical network, characterized by the maximum transmitted power between the

nodes of the electrical network. Switching in the electrical network and power imbalance in nodes during transmission of electricity are reasons of overloads and blackouts. To prevent overloads, the transmission volumes are reduced. It is the reason for a decrease in the reliability of power supply to consumers, the efficiency of using energy resources and disconnection of systems. In practice, the traditional methods of reducing network congestion are generation regulation, changing the network topology, and, if they are not enough, disconnecting consumers from the power grid. METHODS. Solving the problem, a computer model was used, created in the RastrWin3. This study transmission capacity of the electrical network with the taking influence equalizing EMF between the nodes of the power grid. RESULTS. The article describes the relevance problems, it is shown that the regulation of the equalizing EMF allows you to change the value of the maximum allowable power transmitted between the nodes of the electrical network. CONCLUSION. The results of the study can be used in the practice of dispatch control to solve problems of improving the reliability, planning and operating the power system in real time. The efficiency of the proposed algorithm is tested experimentally.

Key words: *power system; mathematical model; electric power mode; heterogeneous electric network; equalizing EMF.*

For citation: Motovilov AI., Solovejev II. Increasing the transmission capacity an inhomogeneous electrical network by regulating the equalizing EMF *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24 (1): 52-60. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-52-60.

Введение

Энергосистемы районов крайнего севера России состоят из удаленных друг от друга энергоузлов, связанных сетями высокого напряжения 110-330 кВ. Электрические сети энергосистем представляют собой замкнутые контуры, содержащие источники питания, нагрузочные узлы, (авто) трансформаторы и связи различного класса напряжения. Сети как правило, являются неоднородными, т.е. содержат участки с различным отношением реактивного сопротивления к активному. Неоднородность сети является причиной возникновения уравнильных ЭДС между узлами сети, приводящим к перераспределению потоков мощности по элементам контуров электрической сети.

Процесс передачи электроэнергии между узлами электрической сети сопровождается коммутациями и небалансами мощностей в узлах, что приводит к перегрузкам отдельных участков сети и аварийным отключениям [1]. Поэтому величина сальдо-перетоков активной мощности строго контролируется диспетчерской службой энергосистемы. Уровень риска возникновения отказов оборудования при выполнении переключений в электроэнергетической системе (ЭЭС) резко возрастает. Поэтому до начала изменения схемы электросети диспетчер энергосистемы контролирует соответствие заранее определенных режимных указаний фактическим условиям работы ЭЭС, которые могут быть не актуальными. Основная задача процесса оперативно-диспетчерского управления заключается в том, чтобы параметры, определяющие режим работы ЭС, не превышали допустимых значений в любой момент времени. При перегрузке сальдо-переток в контролируемом сечении [2-4] превышает расчетный максимально допустимый для текущей схемы, и/или возникает превышение длительно-допустимой токовой нагрузки. Для ввода сальдо-перетока в область допустимых значений эксплуатирующими организациями энергосистемы устанавливается специальное дополнительное оборудование [5], при оперативном управлении применяются меры, основанные на использовании текущих свойств энергосистемы [6-9], такие как регулирование генерации в рассматриваемых энергоузлах, изменение топологии сети, а также, при недостаточной эффективности первых двух способов, ввод ограничений электроснабжения потребителей. Регулирование активной мощности может отрицательно сказаться на экономичности работы энергосистемы, а

реактивной на уровне напряжений. Изменение топологии сети ограничено незначительным количеством участков электросети, переводимых на баланс другой части энергосистемы, поэтому топологический способ не позволяет устранить большие перегрузки. Использование традиционных способов регулирования сальдо-переток усиливает неравномерность загрузки параллельно работающих элементов неоднородной сети, что увеличивает вероятность возникновения каскадного сценария развития аварий. Таким образом анализ и оценка пропускной способности сети энергосистемы является важной и актуальной задачей.

В неоднородной электрической сети между узлами электросети возникают уравнивающие ЭДС, вызывающие уравнивающие токи. Уравнивающие токи накладываются на токи нагрузки, увеличивая их. Авторами предлагается дополнительно к традиционным способам снижения перегрузки элементов сети перед вводом ограничений электроснабжения потребителей управлять распределением мощностей между элементами неоднородной электрической сети регулированием величинами уравнивающих ЭДС (токов) в онлайн режиме. Управление уравнивающими токами приводит к увеличению максимально допустимого сальдо-перетока активных мощностей, т.е. повышению пропускной способности для текущей схемы, что позволит повысить устойчивость энергосистемы и предотвратить аварии из-за превышения допустимой токовой нагрузки.

Цель исследования заключается в разработке принципиально нового подхода к увеличению пропускной способности сети энергосистем.

Задача исследования - разработка алгоритма оценки пропускной способности неоднородной электрической сети в зависимости от уравнивающей ЭДС в контуре. Решение задачи позволит повысить энергоэффективность энергосистемы и минимизировать объемы ограничений электроснабжения потребителей при ликвидации перегрузок участков электросети.

Методы

Диспетчер перед отдачей команды (разрешения) на отключение линии электропередач и оборудования должен определить необходимые параметры функционирования энергосистемы и предотвратить аварии в случае единичного отказа оборудования. Для повышения пропускной способности сети разработан алгоритм оценки пропускной способности неоднородной электрической сети.

Структура алгоритма:

1. Расчет электрического режима методом Ньютона по известным, переданным в диспетчерский центр по каналам телеметрии, значениям сопротивлений ветвей и активным, реактивным мощностям узлов генерации и нагрузки. Расчет предельного режима по условию устойчивости энергосистем методом утяжеления.

Для контуров электрической сети необходимо выбрать управляемые узлы и ветви, оказывающие влияние на уравнивающую ЭДС между узлами, и в уравнениях баланса активной и реактивной мощности учесть крайние положения управляемых параметров. Таким образом получим массив исходных данных (1) изменения тока по элементам электрической сети от передаваемой мощности и управляемых параметров узлов и ветвей. Обработка этих данных позволит определить условия, при которых будет обеспечена максимальная пропускная способность электросети:

$$I = f(P_{np}; K_i) \quad (1)$$

где P_{np} – предельное значение активной мощности по статической аperiodической устойчивости; K_i – значения управляемых параметров узлов и ветвей в замкнутом контуре.

Для узлов, представляющих собой шины низшего напряжения трансформаторной подстанции в уравнениях баланса активной и реактивной мощности, необходимо учесть крайние положения переключателя числа витков обмотки высшего напряжения трансформатора.

Для решения задачи снижения перегрузки формируется целевая функция - математическая модель (рис. 1) установившегося режима работы сетевого элемента [10-13]. Модель отражает зависимость пропускной способности электрической сети (P_{\max}) от значений управляемых параметров узлов и ветвей в замкнутом контуре и длительно-допустимой токовой нагрузки сетевого элемента.

2. Замена исследуемого объекта пассивным двухполюсным устройством, который соответствующим образом реагирует на заданное входное воздействие.

3. Определение параметров полинома по входным и выходным сигналам.

Коэффициенты a_j полинома целевой функции определяются на основе факторного анализа. Коэффициенты K_i , при которых снижается токовая нагрузка с перегруженных элементах сети, определяются по целевой функции оптимизации.

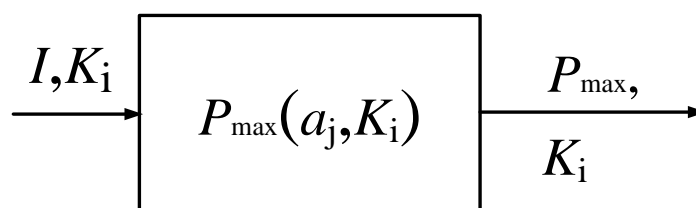


Рис. 1 Математическая модель исследуемого сетевого элемента

Fig.1 Mathematical model of an electrical network element

Результаты

Апробация предлагаемого алгоритма проведена на примере электрической сети с параллельно работающими силовыми автотрансформаторами (рис.2). Электрическая сеть содержит два узла напряжением 110 кВ, четыре узла - 220 кВ, однородных ветвей 110 кВ, 220 кВ и два автотрансформатора. Расчетные данные ветви 220 кВ соответствуют линии электропередач, выполненной проводами АС 300/39, длиной 100 км, ветвь 110 кВ подобрана с такими же параметрами. Расчетные параметры автотрансформаторов соответствуют каталожным данным АТДЦТН-250000/220/110. Модель учитывает, что процесс передачи энергии сопровождается потерями мощности и напряжения в элементах электросети, которые нелинейно зависят от уровня напряжения, а также изменение мощности нагрузки узла по закону статических характеристик нагрузки по напряжению.

В однородной сети нагрузка равномерно распределится между автотрансформаторами при выполнении условий:

- одинаковой фазировки трансформаторов, обусловленной согласованием фаз всех рабочих элементов электрической цепи со стороны высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений трансформатора. Напряжения на сторонах ВН и НН трансформаторов равны;
- равенство коэффициентов трансформации ($K_{тр}$), их различие не превышает $\pm 0,5\%$;
- равенство напряжений короткого замыкания u_k трансформаторов, максимальная разница не превышает 10%;
- группы соединений обмоток одинаковы;
- мощность параллельно работающих трансформаторов отличаться не более чем в 3 раза.

Невыполнении одного из условий приводит к появлению в контуре с автотрансформаторами уравнивающей ЭДС. Управляемыми параметрами ветвей в исследуемом замкнутом контуре будут значения коэффициентов трансформации. Таким способом регулируем в контуре уравнивающую ЭДС.

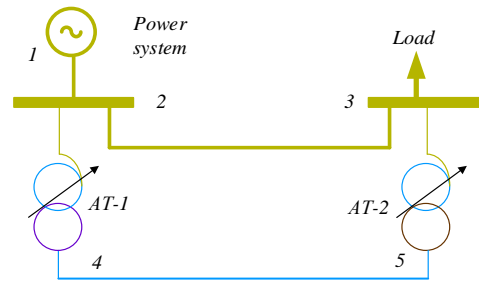


Рис. 2 Схема исследуемой энергосистемы

Fig.2 Scheme of the studied power system

Исходные данные для анализа пропускной способности электросети получены в виде зависимостей тока нагрузки от Ктр автотрансформаторов с использованием ПК *RastrWin3* [14]. Реальная электрическая сеть заменена двухполюсником с эквивалентными параметрами при этом учитывается, что на перераспределение реактивных и активных мощностей в контуре основное влияние оказывает продольная и поперечная ЭДС соответственно [15, 16].

Балансирование по активной и реактивной мощности выполняется в узле 1, нагрузка сосредоточена в узле 3. Ветви между узлами являются связями: 4-5 - связь 110 кВ. 2-3 - связь 220 кВ, 1-2 – связывают изолированную энергосистему с внешней системой.

Предельный по статической аperiodической устойчивости режим получен при расчете электрического режима в соответствии с пунктом 1 алгоритма. Зафиксировано превышение длительно-допустимой токовой нагрузки линии 220 кВ, при этом токовая нагрузка линии 110 кВ составляет 60 % от длительно-допустимой токовой нагрузки. Необходимо определить управляющие воздействия, ликвидирующие перегрузку, без отключения потребителей и ограничения сальдо-перетока мощности, и увеличивающие пропускную способность электросети.

В результате выполнения пункта 2 алгоритма с учетом особенностей исследуемой сети составлена математическая модель пропускной способности сети (2).

$$P_{\max}(K_1, K_2) = \frac{I_{\text{длtn}}}{a_0 + a_1 K_1 + a_2 K_2 + a_3 K_1^2 + a_4 K_2^2 + a_5 K_1 K_2} \quad (2)$$

где a_j – искомые коэффициенты полинома; $I_{\text{длtn}}$ – длительно-допустимая токовая нагрузка исследуемого сетевого элемента; K_1 и K_2 – коэффициенты трансформации автотрансформаторов в замкнутом контуре.

По пункту 3 алгоритма получены коэффициенты полинома (таблица 1), позволяющие определить значения коэффициентов трансформации для перераспределения токовой нагрузки с целью обеспечения максимальной пропускной способности исследуемой электрической сети и ликвидации перегрузки.

Таблица 1

Коэффициенты полинома определения максимальной пропускной способности сети

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
3,953	-3,186	1,281	-3,029	1,218	1,218

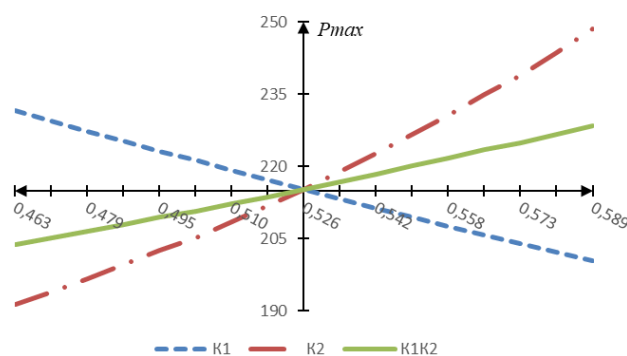


Рис. 3 Анализ чувствительности пропускной способности электросети к коэффициентам трансформации

Fig.3 Analysis of power grid capacity sensitivity to transformation rations

Анализ чувствительности (рис. 3) и значений коэффициентов полинома a_1 и a_3 показывают, что поток мощности по линии электропередач 220 кВ на прямую зависимость от коэффициента трансформации автотрансформатора 1, влияние автотрансформатора 2 будет иметь обратное значение, что показывают коэффициенты a_2 и a_4 . Одновременное изменение коэффициентов трансформации характеризуется коэффициентом a_5 показывает, что взаимное увеличение коэффициентов имеет меньшее влияние на пропускную способность сети чем изменение одного из коэффициентов. Таким образом максимальное увеличение пропускной способности достигается при уменьшении K_1 и увеличении K_2 .

Достоверность полученных результатов оценена с использованием коэффициента (индекса) множественной (совокупной) корреляции R , рассчитанной по формуле (3).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(P_{calc_i} - \bar{P}_{calc})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_{calc_i} - \bar{P}_{calc})^2}}$$

где P_{calc_i} – расчетное значение активной мощности;

\bar{P}_{calc} – среднее значение расчетной активной мощности;

P_i – рассчитанная активная мощность с помощью ПК *RastrWin3*;

\bar{P} – среднее значение рассчитанной активной мощности с помощью ПК *RastrWin3*.

В зависимости от тесноты связи R может принимать значения от 0 до 1. Коэффициент корреляции был определен для максимальной мощности по условию устойчивости при различных комбинациях коэффициентов трансформации. Коэффициент корреляции составил 0,98, что может служить основанием для оценки рассчитанных с помощью предложенного алгоритма значений как точных.

Выводы

Исследования показали, что регулирование уравнивающей ЭДС приводит к изменению пропускной способности электросети. В частности, в рассмотренном примере пропускная способность электросети увеличивается до 1,5 раз, минимальная пропускная способность составляет 179 МВт, а максимальная - 271 МВт. Разработанный алгоритм позволяет значительно снизить объем вычислений, необходимых при принятии решений по оперативному управлению энергосистемой, для недопущения аварий.

Мы полагаем, что предложенный алгоритм моделирования процессов в элементах энергосистемы на основе компьютерной модели дополняет существующие практические

мероприятия по снижению перегрузок межсистемных связей. Перспективным является применение разработанного алгоритма с использованием данных телеметрии.

Литература

1. Kamali S. and T. Amraee, Blackout prediction in interconnected electric energy systems considering generation re-dispatch and energy curtailment. *Applied Energy*, 2017. 187: p. 50-61.
2. Петров В.В. Разработка алгоритма поиска уровней напряжений в контрольных узлах, обеспечивающих снижение сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4(135). С. 148-157.
3. Sweeney J.L. The California electricity crisis. 2002, Stanford, Calif.: Hoover Institution Press.
4. Mao, A., J. Yu, and Z. Guo. Electric power grid structural vulnerability assessment. in 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2006.
5. Воропай Н.И., Курбацкий В.Г., Томин Н.В., и др. Комплекс интеллектуальных средств для предотвращения крупных аварий в электроэнергетических системах. Новосибирск: Изд-во Наука, 2016. 332 с. ISBN 978-5-02-038717-1.
6. Мотовилов А.И., Соловьев И.И. Онлайн оценка пропускной способности электрической сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 3. С. 51-59.
7. Шахмаев И.З., Гайсин Б.М., Якимов Б.Р. Влияние неоднородности параметров электротехнических систем на возникновение и развитие каскадных аварийных процессов // Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 110-летию А.М. Бамдаса. Уфа 2015 г. С. 47-51.
8. Петров В.В., Альмендеев А.А., и др. Анализ влияния изменения уставок по напряжению на электростанциях на значения сальдо-перетока активной мощности в сечении // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2018. № 5. С. 41-50.
9. Gutierrez F., et al., Vulnerability Analysis of Power Grids Using Modified Centrality Measures. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013.
10. Akdeniz E. and M. Bagriyanik. A knowledge based decision support algorithm for power transmission system vulnerability impact reduction. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016. V. 78: p. 436-444.
11. Zio E. and Aven T. Uncertainties in smart grids behavior and modeling: What are the risks and vulnerabilities? How to analyze them? *Energy Policy*, 2011. V. 39(10). p. 6308-6320.
12. 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.
13. Грановский В.А. Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. 1990. 288.
14. Программный комплекс «RastrWin3» Руководство пользователя.
15. Мотовилов А.И. Увеличение допустимых перетоков с помощью изменения параметров электрической сети // Электроэнергетика глазами молодежи - 2020: материалы XI Международной научно-технической конференции. В 2-т., Ставрополь, 15–17 сентября 2020 года. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. С. 93-96.
16. Мотовилов А.И., Андреев Р.А., Андреева Н.А. An online approach to modelling network elements to improve the manageability of power system based on an active experiment. Материалы XXIV международной научно-практической конференции. Академическая наука - проблемы и достижения, 12-13 октября 2020 г. North Charleston, USA, С.194 С.120-126. ISBN 978-1-71650-139-5.

Авторы публикации

Мотовилов Алексей Иванович – старший преподаватель кафедры электроэнергетики и электротехники, Северного (Арктического) Федерального Университета. E-mail: Alex.Motovilov@mail.ru.

Соловьев Иван Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники, Северный (Арктический) Федеральный Университет. E-mail: i.solovev@narfu.ru.

References

- 1 Kamali S. and T. Amraee, Blackout prediction in interconnected electric energy systems considering generation re-dispatch and energy curtailment. *Applied Energy*. 2017;187:50-61.
- 2 Petrov V. Development of a search algorithm of control node voltage levels ensuring active power flow balance reduction in a controlled section. *Proceedings of Irkutsk state technical university*. 2018;22(4(135):148-157. doi 10.21285/1814-3520-2018-4-148-157.
- 3 Sweeney JL. *The California electricity crisis*. 2002, Stanford, Calif.: Hoover Institution Press.
- 4 Mao A, Yu J, and Guo Z. *Electric power grid structural vulnerability assessment*. in 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2006.
- 5 Voropai NI, Kurbatsky VG, Tomin NV, et al. *A complex of intellectual means for preventing major accidents in electric power systems*. Novosibirsk: Publishing house Nauka, 2016. – 332 с. ISBN 978-5-02-038717-1.
- 6 Motovilov AI, Solovejev II. Online electric network capacity assessment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22 (3):51-59. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-51-59.
- 7 Shakhmaev IZ, Gaisin BM, Yakimov BR. Influence of heterogeneity of parameters of electrical systems on the occurrence and development of cascade emergency processes. *All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 110th anniversary of A.M. Bamdas*. Ufa 2015. p. 47-51.
- 8 Polishchuk VI. Analysis of the influence of voltage levels on the power station to the maximum allowable flow of active power in cross-section. *Electrical equipment: operation and repair*. 2018;5:41-50.
- 9 Gutierrez F., et al. Vulnerability Analysis of Power Grids Using Modified Centrality Measures. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013.
- 10 Akdeniz E. and Bagriyanik M. A knowledge based decision support algorithm for power transmission system vulnerability impact reduction. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2016;78:436-444.
- 11 Zio E. and Aven T. Uncertainties in smart grids behavior and modeling: What are the risks and vulnerabilities? How to analyze them? *Energy Policy*, 2011;39(10):6308-6320.
- 12 Gaisin BM. A way of making effective decisions to improve survivability in the design and development of power systems *Vestnik USATU. Electrical engineering*. 2017;21(3 (77): 47 – 53. Ufa: USATU.
- 13 Granovsky VA, Siraya TN. *Methods for processing experimental data during measurements*. L.: Energoatomizdat. 1990. P.288.
- 14 *User manual of software package «RastrWin3»*.
- 15 Motovilov AI. Increase maximum power flow by changes parametres of electrical network. *Electric Power Industry through the Eyes of Youth - 2020: Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference*. In 2-t., Stavropol, September 15-17, 2020. Stavropol: North Caucasus Federal University, 2020. pp. 93-96.
- 16 Motovilov AI, Andreev RA, Andreeva NA. *An online approach to modelling network elements to improve the managebility of power system based on an active experiment*. Materials of

the XXIV International Scientific and Practical Conference. Academic science -problems and achievements XXIV, October 12-13, 2020 North Charleston, USA, p. 120-126 ISBN 978-1-71650-139-5.

Authors of the publication

Aleksei I. Motovilov – Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia, E mail: Alex.Motovilov@mail.ru .

Ivan I. Solovejev – Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia, E mail: i.solovev@narfu.ru.

Получено **24.02.2022г.**

Отредактировано **01.03.2022г.**

Принято **09.03.2022г.**