



## ОЦЕНКА ИНДЕКСА УСТОЙЧИВОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПИТАЮЩИХ ЗАРЯДНЫЕ СТАНЦИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОСЛОЙНОГО ПЕРСЕПТРОНА

А. Альзаккар<sup>1</sup>, Н.П. Местников<sup>2</sup>, В.В. Максимов<sup>1</sup>, И.М. Валеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>, [Ahmadalzakkar86@gmail.com](mailto:Ahmadalzakkar86@gmail.com)<sup>1</sup>

**Резюме:** Обеспечение устойчивости напряжения энергетической системы является одним из ключевых проблем в планировании и эксплуатации энергосистемы. В настоящий момент в результате ряда технологических инцидентов в виде нарушения устойчивости напряжения энергосистемы были испытаны многослойные перцептроны на территории различных странах ЦЕЛЬ. Разработка интеллектуального подхода к оценке Индекса Устойчивости Напряжения нагрузки (ИУН) в энергосистеме с использованием методов вычислительного интеллекта (нейронные сети). МЕТОДЫ. В ходе проведения данных исследований применен способ оценки ИУН, который применяется для мониторинга устойчивости напряжения в энергосистеме с помощью метода «СмартПарк». РЕЗУЛЬТАТЫ. Получены результаты обеспечения этапа разработки, который обосновывает возможность применения Многослойного Перцептрона (МСП) для оценки ИУН с высокой степенью точности. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В ходе выполнения данных исследований авторами статьи выдвинуты следующие выводы: представлен подход, основанный на базе многослойной перцептронной (МСП) нейронной сети с прямой связью; проведена оценка ИУН на примере энергосистемы с применением метода «СмартПарк»; представленный подход нейронной сети не зависит от напряжения холостого хода на определенной шине нагрузки; наличие показателей активной мощности, реактивной мощности и напряжения на шине нагрузки достаточно для проведения оценки ИУН; подход МСП позволяет точно оценить ИУН даже при изменении топологии и условий эксплуатации. Полученные показатели могут быть применены в изменении методики оценки устойчивости напряжения в электротехнических системах и комплексах и расчета их рабочих режимов.

**Ключевые слова:** устойчивость; линия электропередачи; СмартПарк; ИУН; нейронная сеть; многослойный перцептрон.

**Благодарности:** выражаем слова благодарности в адрес доктора технических наук, профессора И.М. Валеева за экспертные советы и поддержку на протяжении всей научно-исследовательской работы, а также доктора технических наук, профессора Максимова В.В. за поддержку по лабораторной части настоящей статьи. Вместе с тем данная статья выполнена во исполнение обязательств Гранта СВФУ им. М.К. Аммосова на публикацию научно-исследовательских статей от 01.2022 года.

**Для цитирования:** Альзаккар А., Местников Н.П., Максимов В.В., Валеев И.М. Оценка индекса устойчивости напряжения электрических сетей питающих зарядные станции электромобилей с применением многослойного перцептрона // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 36-49. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-36-49.

## ASSESSMENT OF THE VOLTAGE STABILITY INDEX OF ELECTRIC NETWORKS SUPPLYING CHARGING STATIONS USING A MULTILAYER PERCEPTRON

A. Alzakkar<sup>1</sup>, NP. Mestnikov<sup>2</sup>, VV. Maksimov<sup>1</sup>, IM. Valeev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>, [Ahmadalzakkar86@gmail.com](mailto:Ahmadalzakkar86@gmail.com)<sup>1</sup>

**Abstract:** Ensuring power system voltage stability is one of the key challenges in power system planning and operation. At the moment, as a result of a number of technological incidents in the form of a violation of the stability of the voltage of the power system, multilayer perceptrons were tested on the territory of various countries. **PURPOSE.** Development of an intelligent approach to assessing the Load Stability Index (LSI) in the power system using computational intelligence methods (neural networks). **METHODS.** In the course of these studies, a method for estimating the ISI was used, which is used to monitor the stability of voltage in the power system using the "Smart Park" calculation method. **RESULTS.** The results of providing the development stage are obtained, which substantiate the possibility of using the Multilayer Perceptron (MLP) for estimating the IEL with a high degree of accuracy. **CONCLUSION.** In the course of these studies, the authors of the article put forward the following conclusions: an approach based on a multilayer perceptron (MPP) neural network with feed-forward is presented; an assessment of the ISI was carried out on the example of a power system using the calculation method "Smart Park"; the presented neural network approach does not depend on the open-circuit voltage on a particular load bus; the presence of indicators of active power, reactive power and voltage on the load bus is sufficient to assess the IPL; The MSP approach allows for an accurate assessment of the ISI even when the topology and operating conditions change. The obtained indicators can be applied in changing the methodology for assessing the stability of voltage in electrical systems and complexes and calculating their operating modes.

**Key words:** Stability; transmission lines; Smart Park; VSI; neural network; multilayer perceptron.

**Acknowledgments:** We express our gratitude to the Doctor of Technical Sciences, Professor I.M. Valeev for expert advice and support throughout the research work, as well as the Doctor of Technical Sciences, Professor Maximov V.V. for support in the laboratory part of this article. At the same time, this article was fulfilled in fulfillment of the obligations of the Grant of SVFU named after M.K. Ammosov to publish research articles of 01.2022.

**For citation:** Alzakkar A, Mestnikov NP, Maksimov VV, Valeev IM. Assessment of the voltage stability index of electric networks supplying charging stations using a multilayer perceptron. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(2):36-49. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-36-49.

### **Введение**

В последние годы устойчивость напряжения энергосистемы стала проблемой, вызывающей серьезную озабоченность, как при планировании, так и при эксплуатации энергосистем, в результате ряда крупных отключений электроэнергии (Блэкаут), которые произошли во многих странах из-за проблем с устойчивостью напряжения [1, 2].

Это произошло в основном из-за того, что энергосистемы работали ближе к своим пределам устойчивости из-за повышенного спроса на электроэнергию [3].

Было проведено множество исследований по оценке индексов устойчивости напряжения в целях определения перечня необходимых действий для снижения риска возникновения неустойчивости в энергосистеме путем улучшения устойчивости ее напряжения.

Сравнительные исследования и анализ шести различных индексов устойчивости напряжения рассмотрены, и представлены А. Mehrizi-Sani, R. Iravani [4].

Авторы R. Nuqui, A. Phadke [5] представили ИУН для простых, но эффективных средств измерения расстояния силовой системы к его пределу устойчивости.

В своих работах авторы R. Cardenas, R. Pena, S. Aleruz, G. Asher, Н. П. Шкитина [6, 7] исследовали влияние плагинов Подключаемых Электромобилей (ПЭМ) к стойке для парковки (*СмартПарк*) на устойчивость энергосистемы.

В частности, в процессе исследования, выявлены характеристики напряжения после изменения потребности в мощности ПЭМ. Когда ПЭМ разряжается в сети питания, усиливается поддержка напряжения системы, в то время как действие зарядки сопровождается падением напряжения в области нагрузки. Способ оценки ИУН, разработанный в данном исследовании, применяется для мониторинга устойчивости напряжения в энергосистеме с помощью (*СмартПарк*).

*СмартПарк* - это специализированное место для парковки автомобилей, созданное с использованием датчиков и современных технологий для быстрого и удобного поиска

парковочных мест, обеспечения безопасности и автоматизации процесса постановки автомобиля на стоянку.

*SmartPark* состоит из подключаемых электромобилей (ПЭМ) к энергосистемам. Величина нагрузки ПЭМ в любой момент времени зависит от количества транспортных средств, подключенных к сети, и состояния заряда аккумуляторной батареи. ПЭМ могут, как обеспечивать активную мощность системы, когда батарея разряжена, так и получать энергию от системы во время зарядки. Когда ПЭМ отдают энергию в сеть, они служат дополнительным источником энергии и, следовательно, помогают улучшить запас устойчивости сети. В частности, от ПЭМ можно реализовать дополнительную поддержку реактивной мощности, что улучшает устойчивость напряжения системы.

Авторы С. Canizares, A. de Souza, V. Quintana [8] в своем исследовании описали влияние, используя индекс производительности для обнаружения близости к точке статического коллапса напряжения.

Авторы P. Kessel, H. Glavitsch [9] разработали индекс устойчивости по напряжению на основе решения уравнения потока мощности, считая, что индекс является количественной мерой для оценки расстояния фактического состояния системы до предела устойчивости.

Авторы Воропай Н.И., Томин Н.В. [10] исследовали влияние характеристических индикаторов устойчивости ЭЭС (коэффициенты матрицы Якоби установившегося режима, индекс ИНУ) в реализации необходимых мероприятий по предотвращению серьезных аварий.

Научная значимость данного исследования заключается в том, что недостатком использования ИУН является зависимость его расчета от фазора напряжения без нагрузки на шине нагрузки для данной топологии системы. Поскольку напряжение без нагрузки зависит от топологии и операционной точки системы, или изменения рабочей точки. На практике трудно получить напряжение холостого хода в шине.

Авторы G. Weili, W. Haikun, Z. Junsheng, L. Weiling, Z. Kanjian [11] в своем исследовании описали эксплицитные выражения двух важных ожиданий, на основе которых получили усредненные уравнения многослойных перцептронов.

Предлагаемый нами многослойный перцептрон (МСП), способный оценить ИУН без непосредственного получения напряжения, без нагрузки, преодолевает это ограничение и облегчает определение в режиме онлайн и использование ИУН. Количество объектов передачи электроэнергии быстро увеличивается и требует внедрения новых технологий для эффективного и быстрого контроля, чтобы обеспечить их надежность работы.

#### ***Материалы и методы.***

##### *А. Индекс Устойчивости Напряжения (ИУН):*

Индекс нагрузки устойчивости напряжения (ИУН), используемый в этой статье, рассчитывается из измерений Единицы Измерения Фазора (ЕИФ) [5] величин и углов напряжения при нагрузочных шинах. ЕИФ может предоставить измерения в реальном времени фазорам напряжения и фазорам тока инцидента. Данная информация может быть адекватно использована для определения запаса устойчивости напряжения непосредственно из данных проведенных замеров и в режиме реального времени [12]. Минимальное количество ЕИФ, которое наблюдается системой, помещается на заранее определенные шины, чтобы предпринять прямые измерения, в то время как информация фазора напряжения на оставшихся шинах рассчитывается из этих измерений и известных импульсов передачи системы.

Математическая формулировка технологии индекса устойчивости напряжения, используемая в этой статье, получена из уравнений напряжения двухшинной сети (рис.1).

Рассмотрим строку, соединяющую две шины, шины 1 и шина 2, где  $P_1$  и  $Q_1$  являются активной, и реактивной мощностью, вводимыми в линию на шине 1 и  $P_2$  и  $Q_2$  - это активная и реактивная мощность на шине 2, как показано ниже.  $V_1$  и  $V_2$  являются величины напряжения на шине 1 и шина 2 соответственно и  $\theta_1$  и  $\theta_2$  и соответствующие углы фазы напряжения [13, 14].

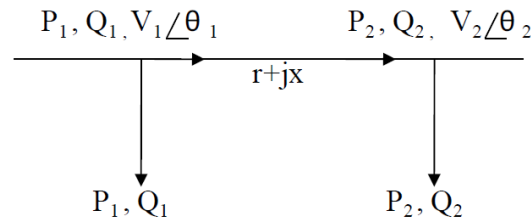


Рис.1. Две шины сети.

Fig. 1. Two buses of the network.

Следующие уравнения могут быть получены в виде выражения 1:

$$|I_1|^2 = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{V_1^2} \quad (1)$$

Активная мощность на шине 1 вычисляется в виде выражения 2:

$$P_2 = P_1 - P_{\text{потр}} \quad (2)$$

Реактивная мощность на шине 2 вычисляется в виде выражения 3:

$$Q_2 = Q_1 - Q_{\text{потр}} \quad (3)$$

Потери активной мощности вычисляются в виде выражения 4:

$$P_{\text{потр}} = \left( \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) \cdot r \quad (4)$$

Потери реактивной мощности вычисляются в виде выражений 5-7:

$$Q_{\text{потр}} = \left( \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) \cdot x \quad (5)$$

$$|I_1|^2 = \frac{\left[ P_2^2 + \left( \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) \cdot r \right]^2 + \left[ Q_2^2 + \left( \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) \cdot x \right]^2}{V_1^2} \quad (6)$$

$$V_1^2 = V_2^2 + 2(P_2 \cdot r + Q_2 \cdot x) + \left( \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2} \right) (r^2 + x^2) \quad (7)$$

Уравнение напряжения может быть записано в виде выражения 8:

$$V_2^4 + V_2^2 \left[ 2(P_2 r + Q_2 x) + (P_2^2 + Q_2^2)(r^2 + x^2) \right] \quad (8)$$

Выражение представляет собой квадратное уравнение  $V_2$  и имеет действительные корни и вычисляется в виде выражения 9:

$$8P_2 Q_2 \cdot r \cdot x - 4V_1^2 (P_2 r + Q_2 x) + V_1^4 - 4(P_2^2 \cdot r^2 + Q_2^2 \cdot x^2) \geq 0 \quad (9)$$

Что можно упростить вычисляется в виде выражения 10:

$$\frac{4 \left[ V_1^2 (P_2 r + Q_2 r) + (P_2 r - Q_2 r)^2 \right]}{V_1^2} \leq 1 \quad (10)$$

Следовательно, индекс устойчивости напряжения определяется выражением 11:

$$ИУН = \frac{4[V_1^2(P_2 r + Q_2 x) + (P_2 r - Q_2 x)^2]}{V_1^2} \quad (11)$$

Но необходимо учесть дополнительные граничные условия:

$$V_1 V_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - V_2^2 = P_2 \cdot r + Q_2 \cdot x \quad (12)$$

$$V_1 V_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) = P_2 \cdot r - Q_2 \cdot x \quad (13)$$

Подстановка уравнений (12) и (13) в (11) дает закономерность определения показателя ИУН в виде выражения 14:

$$ИУН = \frac{4[V_1 V_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - V_2^2 \cos^2(\theta_1 - \theta_2)]}{V_1^2} \quad (14)$$

Уравнение для ИУН применяется к эквивалентной схеме Тевенина [15] с учетом шины нагрузки, как показано на рисунке 2.

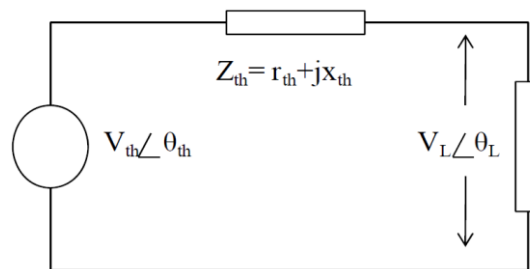


Рис.2. Эквивалентная сеть Тевенина

Fig.2. Equivalentvenin network

Шаги, используемые для получения эквивалента Тевенина, имеет следующие положения:

А) Решения по распределению нагрузки используются для определения профиля напряжения системы при заданных условиях нагрузки.

Б) Напряжение на входе определяется за счет потока нагрузки системы при отключенной нагрузке на соответствующей шине.

Применение уравнения (14) к эквивалентной схеме Тевенина дает уравнение для ИУН в виде выражения 15:

$$ИУН = \frac{4[V_0 V_L \cos(\theta_0 - \theta_L) - V_L^2 \cos^2(\theta_0 - \theta_L)]}{V_0^2} \quad (15)$$

где  $V_0$  и  $V_L$  — величины напряжения с и без нагрузки на шине, а  $\theta_0$  и  $\theta_L$  — измерения фазового угла напряжения с и без нагрузки соответственно. Величина индекса нагрузки устойчивости напряжения меняется от нуля на холостом ходу до единицы в точке предела устойчивости напряжения или обрушения. Индекс показывает расстояние шины до предела устойчивости напряжения. Точка предела устойчивости напряжения, соответствующая  $ИУН=1$  является точкой, в которой коэффициент нагрузки максимален (рис.3).

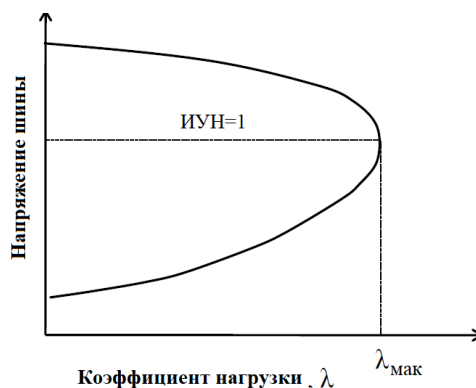


Рис.3. Кривая P-V на шине нагрузки, *Fig.3. The P-V curve on the load bus showing the* показывающая ИУН=1 при максимальном *UL=1 at the maximum load coefficient.* коэффициенте нагрузки.

**Б. Оценка ИУН с использованием многослойного персептрона (МСП)**

Многослойная нейронная сеть персептрона [16] с прямой связью может использоваться для оценки ИУН устойчивости напряжения на шине. Выражения (10) и (14) показывают, что индекс ИУН является функцией активной мощности ( $P$ ), реактивной мощности ( $Q$ ), а также величины напряжения ( $V$ ) и фазы ( $\theta$ ) на шине. Величины выбираются в качестве входных переменных при оценке ИУН с использованием нейронной сети МСП, как показано на рисунке 4.

МСП состоит из 4 нейронов входного слоя, 35 нейронов скрытого слоя и 1 нейрона выходного слоя. Входными данными нейронной сети являются измерения активной и реактивной мощности ( $P$ ,  $Q$ ), напряжения и угла ( $V$ ,  $\theta$ ) на соответствующей шине нагрузки. Выходом нейронной сети является расчетный ИУН устойчивости напряжения на шине нагрузки. Функции активации во входном и выходном слоях являются линейными функциями активации, в то время как в скрытом слое используются сигмоидальные функции активации.

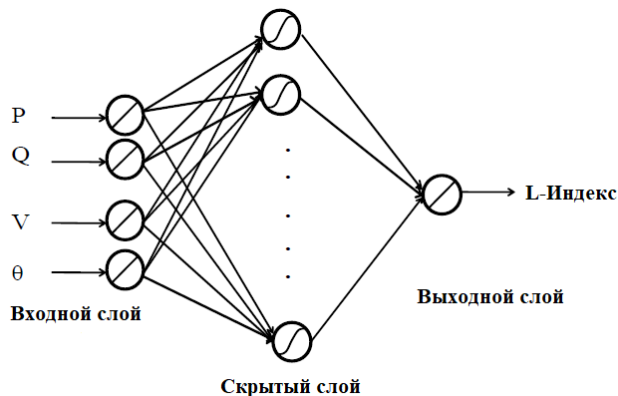


Рис.4. Структура многослойного персептрона для *Fig.4. Structure of multilayered perceptron for the* оценки ИУН. *evaluation of IUN.*

Процесс разработки МСП состоял из двух этапов, показанных на блок-схеме на рисунке 5.

На этапе разработки были получены обучающие данные без подключенных электромобилей. Значения активной мощности и реактивной мощности на негенераторных шинах, а также напряжения на шинах нагрузки снимались при одновременном изменении нагрузки на шине 7 и шине 10 от 0,8 до 1,2 коэффициента нагрузки малыми шагами для получения наборов данных. Напряжения на шинах 7 и 10 использовались для расчета ИУН для шин 7 и 10, соответственно, использовались в процессе обучения МСП в качестве целевых значений для соответствующих наборов активной и реактивной мощности.



Рис.5. Этапы разработки и эксплуатации ИУН.

Fig.5. Stages of development and operation of the PPE.

60 паттернов ввода-вывода были выбраны случайным образом и использованы в качестве обучающих данных. Метод Роя Частиц (МРЧ) использовался для обучения многослойного персептрона. Обучение проводилось на том количестве итераций, при котором получалась приемлемая среднеквадратическая ошибка. На втором этапе (этап эксплуатации) обученный МСП применяется для оценки ИУН в системе.

Во-первых, 40 входных паттернов используются для проверки точности нейронной сети при оценке ИУН. После успешного обучения и проверки нейронная сеть МСП была использована для оценки ИУН тестовой системы с включенными в систему «СмартПарк».

Оценка ИУН проводилась при наличии всех 5 линий электропередачи в системе, а затем также оценивалась аварийность отключения одной линии электропередачи.

### Результаты

На рисунке 6 показана система тестирования устойчивости напряжения на 10 шинах с ПЭМ. Энергосистема состоит из двух генераторов Г1 и Г2, питающих зону нагрузки по 5 ЛЭП параллельных (200 км) и одного локального генератора Г3, обеспечивающего поддержку напряжения в зоне нагрузки.

Шина 10 — это шина, управляемая напряжением, с использованием регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой. Системные параметры и условия загрузки системы, используемые на литературе [2]. Оригинальная система с 10 шинами была изменена путем добавления 2 шин системы «СмартПарк» 11 и 12.

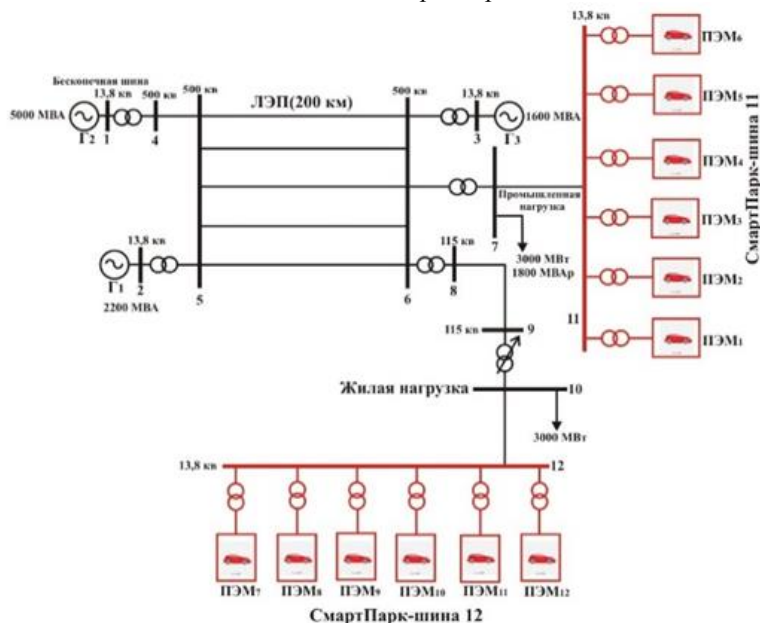


Рис.6. Энергосистема с СмартПарк

Fig.6. Power system with SmartPark

Номинальная (промышленная) нагрузка на шине 7 составляет 3000 МВт, 1800 МВАр, моделируемая как нагрузка постоянной мощности, а нагрузка (жилая) на шине 10 составляет 3000 МВт, моделируемая как нагрузка постоянной мощности. Подключаемые парковки для электромобилей представляют собой шесть «СмартПарк» у шин 11 и 12 мощностью +/- 180 МВт каждая. Процесс разработки и внедрения МСП для оценки ИУН включает два этапа; этап разработки и этап эксплуатации. На этапе разработки МСП обучается для точной оценки ИУН. Производительность МСП проверяется с использованием паттернов наборов входных и выходных данных для тестирования ее производительности. Первый набор результатов для этапа разработки, который показывает, что МСП был успешно обучен для оценки ИУН с высокой степенью точности. Затем применение онлайн приложения, адаптированного на МСП для оценки ИУН энергосистемы с помощью СмартПарк [17, 18]. Целевые значения ИУН и выходные значения МСП, использованные на этапе тестирования, показаны в таблицах 1 и 2. Таблица показывает, что выходные значения МСП очень близки к целевым значениям как на шине 7, так и на шине 10.

Таблица.1

Поток нагрузки шины 7, расчет и оценка ИУН

Напряжение шины 7		P(МВт)	Q(МВАр)	ИУН (расчет)	ИУН (оценка)
(о.е)	(град)				
1,0467	-27,47	2959	-197,2	0,6308	0,6249
1,0441	-27,68	2970	-180,5	0,6379	0,6317
1,0414	-27,91	2980	-164,0	0,6448	0,6386
1,0362	-28,32	3002	-131,4	0,6585	0,6529
1,0336	-28,55	3013	-115,2	0,6652	0,6602
1,0309	-28,76	3024	-99,64	0,6718	0,6676
1,0285	-28,97	3034	-83,90	0,6784	0,6748
1,0232	-29,39	3054	-52,89	0,6912	0,6894
1,0206	-29,59	3063	-37,60	0,6975	0,6965
1,0178	-29,80	3073	-22,49	0,7038	0,7037
1,0154	-30,01	3082	-7,53	0,7101	0,7106
1,0103	-30,40	3100	21,93	0,7221	0,7240
1,0077	-30,59	3109	36,45	0,7282	0,7306
1,0052	-30,80	3117	50,82	0,7340	0,7368
1,0027	-31	3125	65,06	0,7395	0,7429
1,0004	-31,10	3134	79,14	0,7452	0,7490
0,9975	-31,36	3142	93,09	0,7510	0,7547
0,9951	-31,55	3150	106,80	0,7565	0,7604
0,9926	-31,74	3157	120,40	0,7619	0,7656
0,9901	-31,93	3165	134,01	0,7674	0,7709
0,9876	-31,12	3172	147,39	0,7729	0,7760
0,9849	-32,29	3180	160,64	0,7779	0,7809
0,9827	-32,47	3187	173,72	0,7831	0,7855
0,9802	-32,65	3194	186,76	0,7882	0,7901
0,9776	-32,84	3201	199,52	0,7932	0,7944

Таблица.2

Поток нагрузки шины 10, расчет и оценка ИУН

Напряжение шины 10		P(МВт)	Q(МВАр)	ИУН (расчет)	ИУН (оценка)
(о.е)	(град)				
1,0528	-33,80	2979	-963,8	0,5715	0,5703
1,0501	-34,07	2990	-958,9	0,5818	0,5809
1,0449	-34,60	3012	-949,2	0,6020	0,6020
1,0421	-34,88	3023	-944,3	0,6121	0,6123
1,0394	-35,14	3034	-939,5	0,6217	0,6220
1,0341	-35,66	3054	-930	0,6410	0,6416
1,0315	-35,92	3064	-925,2	0,6503	0,6510
1,0288	-36,18	3073	-920,4	0,6594	0,6602
1,0235	-36,68	3092	-911	0,6773	0,6783
1,0209	-36,94	3101	-906,3	0,6862	0,6872
1,0182	-37,19	3110	-901,7	0,6948	0,6958
1,0156	-37,44	3119	-897	0,7033	0,7044
1,0103	-37,92	3136	-887,8	0,7198	0,7211
1,0076	-38,17	3144	-883,2	0,7278	0,7291
1,0051	-38,42	3152	-878,6	0,7358	0,7373



1,0025	-38,66	3160	-874,1	0,7435	0,7451
0,9972	-39,14	3175	-865	0,7587	0,7603
0,9947	-39,36	3182	-860,6	0,7660	0,7674
0,9921	-39,61	3189	-856,1	0,7732	0,7748
0,9895	-39,84	3196	-851,7	0,7803	0,7816
0,9844	-40,30	3209	-842,7	0,7940	0,7950
0,9818	-40,53	3216	-838,5	0,8007	0,8015
0,9792	-40,76	3222	-834,1	0,8072	0,8079
0,9716	-41,43	3240	-821,2	0,8260	0,8254
0,9691	-41,65	3245	-817	0,8320	0,8311

Напряжение уменьшается с увеличением нагрузки. После 3200 МВт шина 10 является критической шиной. Результаты тестирования подтвердили, что МСП точно оценивает ИУН энергосистемы. Среднеквадратическая Ошибка (СКО), полученная с использованием МСП составила  $-8,75 \times 10^{-5}$  о.е.

На рисунках 7 и 8 показаны зависимости напряжения шины и ИУН от активной мощности и реактивной мощности на шине 7. На рисунке 7 видно, что увеличение нагрузки на шинах нагрузки приводит к увеличению ИУН, таким образом, приближается к пределу устойчивости [19, 20].

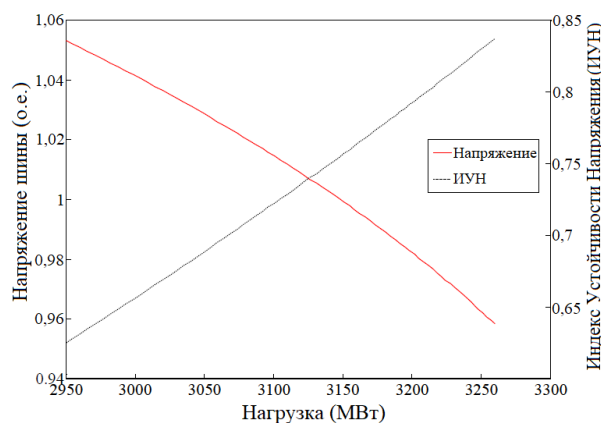


Рис.7. График напряжения на шине от активной и реактивной нагрузки для шины 7

Fig. 7. Tyre voltage graph from the active and reactive load of the tyre 7

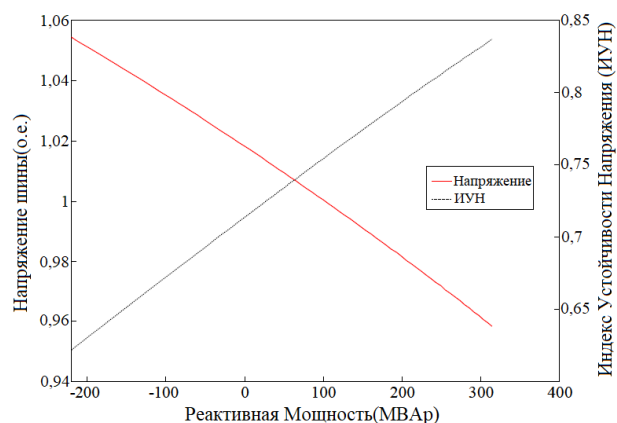


Рис.8. График напряжения на шине от активной и реактивной нагрузки для шины 7

Fig. 8. Tyre voltage graph from the active and reactive load of the tyre 7

На рисунках 9 и 10 показаны изменения мощности СмартПарк на шинах 11 и 12. Обученная нейронная сеть используется для оценки ИУН (10 шин) тестовой системы с «СмартПарк», включенными (шина 11 и шина 12).

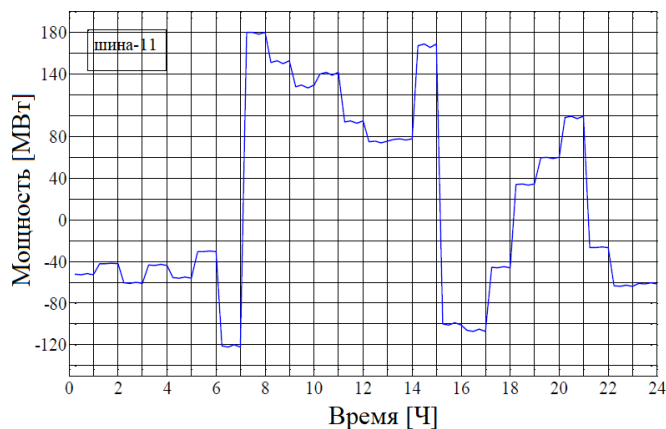


Рис.9. Изменение мощности SmartПарк на шине 11. Fig. 9. Change of SmartPark power on bus 11.

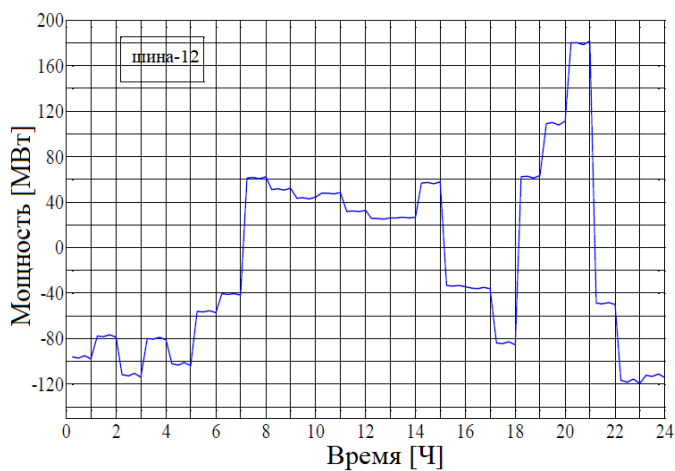


Рис.10. Изменение мощности SmartПарк на шине 12. Fig. 10. Change of SmartPark power on bus 12.

Графики выхода ИУН для МСП за 24-часовой период на шине 7 и шине 10 показаны на рисунках 11 и рисунках 12 соответственно.

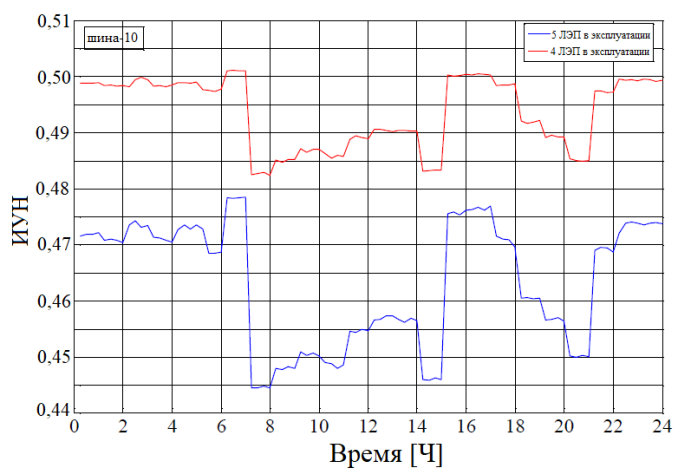


Рис.11. Оцененный ИУН на шине 10 с SmartПарк. Fig. 11. Rated IU on bus 10 with SmartPark.

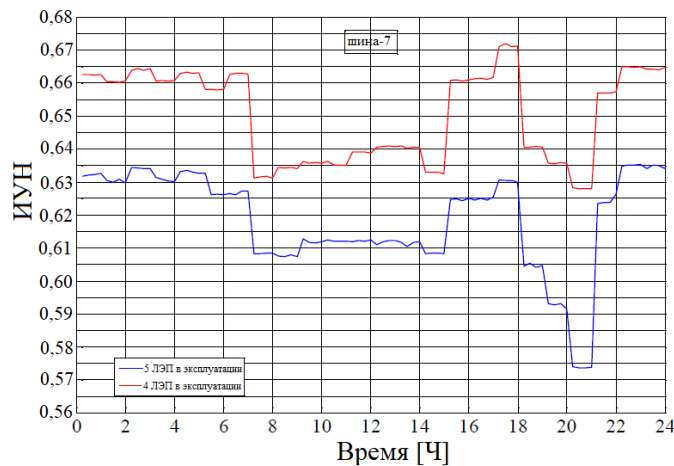


Рис.12. Оцененный ИУН на шине 7 с SmartPark

Fig. 12. Rated IU on bus 7 with SmartPark

На рисунках 10 и 11 видно, что отрицательные значения мощности представляют собой зарядку электромобилей, где активный поток мощности идет от сети к «СмартПарк» и положительные значения мощности представляют собой действие разряда, при котором поток мощности идет от «СмартПарк» к сети.

Были рассмотрены два различных режима работы энергосистемы (показаны на рис.9 и рис.10):

- Система полностью исправна без ошибок;
- С выходом из строя 1 из 5 параллельных ЛЭП.

Из таблиц 1 и 2 обнаружено, что на шинах 7 и 10, когда «СмартПарк» разряжается, увеличение нагрузки на шинах нагрузки приводит к увеличению ИУН, таким образом, приближается к пределу устойчивости. Когда «СмартПарк» подает мощность в сеть, это помогает увеличить запас устойчивости системы. Парковка подает дополнительную мощность в систему (генерирует). Когда «СмартПарк» заряжается, значения ИУН выше, что указывает на то, что система менее стабильна. Запас устойчивости системы варьируется в зависимости от операции «СмартПарк», зарядки и разрядки. Результаты показывают, что система имеет более низкие значения ИУН, следовательно, более стабильна при работе всех пяти линий электропередачи (в сервисе).

Из рисунков 11 и 12 видны обнаруженные при выходе из строя одной ЛЭП более высокие значения ИУН, которые указывают на то, что система менее стабильна, где значения ИУН, соответствующие системе со всеми пятью линиями передачи в сервисе, как более низкие чем значения ИУН, соответствуют системе с 1 из 5 ЛЭП.

### Заключение

В ходе проведения исследований авторами статьи получены следующие результаты и сделаны выводы:

1. Представлен подход, основанный на многослойной перцептронной (МСП) нейронной сети с прямой связью, для оценки ИУН в энергосистеме «СмартПарк» с приведением необходимых закономерностей расчета и графических интерпретаций;
2. Наличие индексов активной и реактивной мощности и напряжения на шине нагрузки достаточны для выполнения оценки ИУН;
3. Подход МСП позволяет точно оценить ИУН даже при изменении топологии и условий эксплуатации.

Научное приращение результатов данного исследования заключается в попытке обоснования возможности проведения оценки ИУН на нагрузки посредством применения подхода, основанного на многослойной перцептронной (МСП) нейронной сети с прямой связью для оценки ИУН в энергосистеме с «СмартПарк». Данная проблематика планируется к рассмотрению авторами в последующих исследованиях.

### Литература

1. P. Kundur Power System Stability and Control // California:EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-035958-X.
2. Taylor C. W. Power System Voltage Stability // California: EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1993. ISBN 0-07-063164-0. G. K.

3. F. Mumtaz, M. H. Syed, M. Hosani, A Novel Approach to Solve Power Flow for Islanded Microgrids Using Modified Newton Raphson with Droop Control of DG // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2015. V. 7.
4. A. Mehrizi-Sani, R. Iravani, Potential-Function Based Control of a Microgrid in Islanded and Grid-Connected Modes // IEEE Transactions on power systems. 2010. V. 25. № 4.
5. R. Nuqui, A. Phadke, Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. V. 20, № 4. pp. 2381-2388.
6. R. Cardenas, R. Pena, S. Alepuz, G. Asher, Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications // IEEE Transactions on Industrial Electronic. 2013. V. 60. № 7.
7. Шкитина Н.П., Анализ влияния стохастической нагрузки электромобилей на распределительную сеть // журнал электроэнергия, Т. 20. № 1. 2021. С. 40-45.
8. С.А. Canizares, Comparison of Performance Indices for Detection of Proximity to Voltage Collapse // IEEE Transactions on Power Systems. 1996. V. 11 № 3. pp. 1441-1450.
9. P. Kessel, H. Glavitsch, Estimating the Voltage Stability of a Power System // IEEE Transactions on Power Delivery. 1986. V.1. № 3. pp. 346-353.
10. Н.И. Воропай, Н.В. Томин, Комплекс Интеллектуальных Средств Раннего Выявления И Предотвращения Возникновения Системных Аварий В Энергообъединениях // Автоматика и телемеханика журнал. 2018. № 10. С. 6-25.
11. G. Weili, W. Haikun, Z. Junsheng, L. Weiling, Z. Kanjian, Application of the error function in analyzing the learning dynamics near singularities of the multilayer perceptrons // Chinese Control Conference (CCC), 2012. pp. 3240-3243.
12. В. Сидорович, Влияние электромобилей на энергосистему// [электронные ресурсы] <https://cutt.us/renen-ru>. Дата обращения: 24.01.2018.
13. Альзаккар А. Применение искусственных нейронных сетей для оценки устойчивости напряжения электроэнергетических систем в Сирии // Международный технико-экономический журнал. 2020. С.87-95.
14. Mestnikov N., Alzakkar A., Valeev I., Maksimov V. Assessment of the Performance of the Solar Power Plant with a Capacity 150W // International Russian Automation Conference, 2021. pp. 404-408.
15. A. Malkhandi, N. Senroy, S. Mishra, A Dynamic Model of Impedance for Online Thevenin's Equivalent Estimation // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2022. V. 69. pp. 194-198.
16. С. В. Pronin, О. I. Maksimychev, A. V. Ostroukh, A. V. Volosova, Creating Quantum Circuits for Training Perceptron Neural Networks on the Principles of Grover's Algorithm // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2022.
17. И. М. Валеев, А. Альзаккар, Гармоники и их Влияние при Определении Метода Компенсации Реактивной Мощности в Электрических Сетях // Вестник Казанского технологического университета. 2020. № 12. С. 24-39.
18. J. Yang; J. Portilla; T. Riesgo, Smart parking service based on Wireless Sensor Networks // Annual Conference of Industrial Electronics Society. 2012. pp. 6029- 6034.
19. А.И. Федотов, Р.Э. Абдуллазянов, Р.М. Мударисов, Методики оценки устойчивости синхронных двигателей при трехфазных коротких замыканиях в системе внешнего электроснабжения // Проблемы энергетики - КГЭУ. Т. 21. № 3-4. 2019. С. 102-112.
20. Т.К. Abdul Rahman and G.B. Jasmon, A New Technique for Voltage Stability Analysis in A Power System and Improved Load Flow Algorithm for Distribution Network // Energy Management and Power Delivery. V. 2 1995. P: 714–719.

#### **Авторы публикации**

**Альзаккар Ахмад** – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

**Местников Николай Петрович** – аспирант Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, ведущий инженер отдела электроэнергетики ИФТПС СО РАН им. В.П. Ларионова.

**Максимов Виктор Владимирович** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «ЭСиС», Казанский государственный энергетический университет.

**Валеев Ильгиз Миргалимович** –д-р техн. наук, профессор, Казанский государственный энергетический университет.

### References

1. P. Kundur. *Power System Stability and Control*. California:EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-035958-X.
2. Taylor CW. *Power System Voltage Stability*. California: EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1993. ISBN 0-07-063164-0. G. K.
3. F. Mumtaz M.H. Syed, M. Hosani, *A Novel Approach to Solve Power Flow for Islanded Microgrids Using Modified Newton Raphson with Droop Control of DG*. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2015.V.17.
4. A. Mehrizi-Sani, R. Iravani. *Potential-Function Based Control of a Microgrid in Islanded and Grid-Connected Modes*. IEEE Transactions on power systems. 2010;25(4).
5. R. Nuqui, A. Phadke. *Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability*. IEEE Transactions on Power Delivery. 2005;20(4):2381-2388.
6. R. Cardenas, R. Pena, S. Alepuz, G. Asher, *Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013;60(7).
7. Shkitina N.P. Analysis of the influence of the stochastic load of electric vehicles on the distribution network. *Electricity magazine journal*. 2022;20(1):40- 45.
8. C.A. Canizares, A. de Souza, V. Quintana. *Comparison of Performance Indices for Detection of Proximity to Voltage Collapse*. IEEE Transactions on Power Systems. 1996;11(3):1441-1450.
9. P. Kessel, H. Glavitsch. *Estimating the Voltage Stability of a Power System*, IEEE Transactions on Power Delivery. 1986;1(3):346-353.
10. Voropay N.I., Tomin N.V. Complex of Intelligent Means for Early Detection and Prevention of System Accidents in Power Pools. *Automation and Telematics Journal*. 2018;10:6-25.
11. G. Weili, W. Haikun, Z. Junsheng, L. Weiling, Z. Kanjian. *Application of the error function in analyzing the learning dynamics near singularities of the multilayer perceptrons*, Chinese Control Conference (CCC). 2012. pp. 3240-3243.
12. V. Sidorovich. The impact of electric vehicles on the energy system// [electronic resources] <https://cutt.us/renen-ru>. Date of access: 24.01.2018.
13. A. Alzakkar, Application of Artificial Neural Networks to Evaluate Stability of Voltage of Electric Power Systems in Syria, *The international technical-economic journal*. 2020;1:87-95. doi: 10.34286/1995-4646-2020-70-1-87-95.
14. Mestnikov N, Alzakkar A, Valeev I, Maksimov V. *Assessment of the Performance of the Solar Power Plant with a Capacity 150W*. International Russian Automation Conference. 2021. P. 404-408.
15. A. Malkhandi, N. Senroy, S. Mishra, *A Dynamic Model of Impedance for Online Thevenin's Equivalent Estimation*. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2022;69:194-198.
16. C.B. Pronin, O I. Maksimychev, A.V. Ostroukh, A.V. Volosova. *Creating Quantum Circuits for Training Perceptron Neural Networks on the Principles of Grover's Algorithm*. Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications.2022.
17. Valeev IM, Alzakkar A. Harmonicas and their Influence When Determining the Method of Compensation of Jet Power in Electrical Networks. *Vestnik of the KSPEU*. 2020;12:1 (45):24-39.
18. J. Yang, J. Portilla, T. Riesgo. *Smart parking service based on Wireless Sensor Networks*. Annual Conference of Industrial Electronics Society, (2012). P. 6029- 6034.
19. Fedotov A.I, Abdullazyanov RE, Mudarisov RM. Synchronous motors stability estimation methodologies under three-phase faults in power supply grids, *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(3-4):102-112.
20. T.K. Abdul Rahman and G.B. Jasmon, *A New Technique for Voltage Stability Analysis in A Power System and Improved Load Flow Algorithm for Distribution Network*. Energy Management and Power Delivery.1995;2:714–719.

### Authors of the publication

**Ahmad Alzakkar** –Kazan State Power Engineering University.

***Nikolai P. Mestnikov*** – North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov

***Victor V. Maksimov*** – Kazan State Power Engineering University.

***Ilgiz M. Valeev*** - Kazan State Power Engineering University.

***Получено***

***25.03.2022г.***

***Отредактировано***

***01.04.2022г.***

***Принято***

***14.04.2022г.***