

Исследование влияния гетерогенности узла нагрузки на его соизмеримость с мощностью источника энергии в автономной энергетической системе

Андрей Александрович Верзилин, Владимир Алексеевич Глухарев,
Иван Николаевич Попов, Владимир Александрович Стрельников, Эльвира Юрьевна Мизюрова
Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Россия
e-mail: verzin-a@mail.ru

Аннотация. В работе приводится исследование влияние гетерогенности узла нагрузки на необходимую и достаточную мощность источника питания и на их соизмеримость. Полученные зависимости применимы к определению параметров выбираемого генераторного электроагрегата в качестве автономного источника электроснабжения для многодвигательной нагрузки, с проверкой выполнения условий загрузки. Для согласования мощностей источника питания с мощностью потребителей автономной энергосистемы предложен критерий соизмеримости. Приводится зависимость для определения коэффициента соизмеримости для автономной энергосистемы электроагрегат – узел электродвигательной нагрузки. Проведен анализ граничной области значений коэффициента соизмеримости для обеспечения рациональной загрузки электроагрегата для длительной работы. Определены условия применения устройств снижения пусковых токов отдельных электродвигателей для снижения мощности электроагрегата на стадии его выбора.

Ключевые слова: энергетическая система; автономный источник; генераторный электроагрегат; электродвигатель; узел нагрузки; длительный режим работы; соизмеримость.

Для цитирования: Верзилин А. А., Глухарев В. А., Попов И. Н., Стрельников В. А., Мизюрова Э. Ю. Исследование влияния гетерогенности узла нагрузки на его соизмеримость с мощностью источника энергии в автономной энергетической системе // Аграрный научный журнал. 2023. № 12. С. 137–141. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp137-141>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Investigation of the influence of the heterogeneity of the load node on its comparability with the power of the energy source in an autonomous energy system

Andrey A. Verzin, Vladimir A. Glukharev, Ivan N. Popov, Vladimir A. Strelnikov, Elvira Yu. Misyurova
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia
e-mail: verzin-a@mail.ru

Abstract. The article considers the investigation of the influence heterogeneity of the load node on the required power of the power source and on their comparability. By checking fulfillment of loading conditions of the electric generator unit, the obtained analytical dependencies in relation to determining parameters of an autonomous power supply source for a multi-motor load are solved. The criterion of comparability was proposed for matching the power of the source with the installed power of consumers of the autonomous energy system. A dependency for determining the comparability coefficient was given for the system the electric generator unit and the load node. The analysis of the permissible solution the comparability coefficient has been carried out for ensuring rational loading of the electric generator unit in the continuous operating. The necessity of using devices for reducing or compensating the reactive power of individual electric loads was assessed to reduce the power of the electric generator unit.

Keywords: energy system; autonomous source; generating unit; electric motor; load node; long operating mode; commensurability.

For citation: Verzin A. A., Glukharev V. A., Popov I. N., Strelnikov V. A., Misyurova E. Yu. Investigation of the influence of the heterogeneity of the load node on its comparability with the power of the energy source in an autonomous energy system. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(12):137–141. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp137-141>.





Введение. Современная концепция обновления централизованной системы электроснабжения наряду с развитием распределенной энергетики является залогом энергетической безопасности. На сегодняшний день в порядок обеспечения параллельной работы объектов электроэнергетики регламентируются правилами технологического функционирования электроэнергетических систем, однако не распространено на использование автономных источников электроэнергии малой мощности.

Исследования показывают, что ряд предприятий имеют возможность использовать собственный источник питания для электроснабжения как предприятия в целом, так отдельных технологических процессов, в том числе в агропромышленном комплексе [1–4]. В то же время в ряде случаев отмечается недостаточно высокий уровень динамической устойчивости автономной системы, вследствие преобладания в таких системах электродвигательной нагрузки [5–7].

Решением в таких случаях выступает завышение номинальной мощности электроагрегата над суммируемой мощностью всех подключаемых электродвигателей, обеспечивающей прямые пуски электродвигателей и установившиеся режимы работы асинхронных электродвигателей. Завышение номинальной мощности электроагрегата сопровождается ухудшением показателей его энергоэффективности в процессе эксплуатации, возрастает удельный расход топлива двигателя внутреннего сгорания (ДВС), увеличиваются вредные выбросы и др.

Чтобы снизить установленную мощность источника питания на стадии его выбора предлагается применение методов регулирования и ограничения нагрузочной способности источника питания, и управление очередностью пуска мощных электродвигателей [1, 6].

Для обеспечения управляемости и экономичности системы ряд исследователей делают акцент на совместную работу традиционной энергетической системы и возобновляемых источников энергии, за счёт перераспределения мощности источников по уровню потребления [3, 4, 8, 9].

Одним из способов решения задачи повышения энергетической эффективности автономных источников является способ по определению необходимой мощности электроагрегата, в котором учитывается соизмеримость отдельных электродвигателей и мощность генератора, с оптимизацией последовательности включения в работу электродвигателей, способствующие повышению показателей энергоэффективности системы.

Методика исследований. Исследование проводилось с использованием теоретических методов исследования, основывающихся на теоретических основах электротехники и теории электрических машин. Основными теоретическими методами являлись анализ, синтез и моделирование.

Цель исследования - оценка влияния потребляемой мощности узла электродвигательной нагрузки на показатели загруженности генераторного электроагрегата.

Результаты исследований. Если в автономной системе электроснабжения, присутствует электроприемник мощность которого соизмерима с мощностью системы, то требуемая мощность источника питания должна определяться с учетом обеспечения устойчивости системы при запуске электроприемников [10].

В начальный момент времени пуска электродвигателя напряжение снижается до минимально возможного значения, в случае успешного пуска электродвигателя от электрогенератора напряжение должно возрасти до установившегося значения. В автономной системе генераторный электроагрегат должен выдерживать мгновенное увеличение нагрузки, соответствующей запускам электродвигателей. При выборе электрогенератора с приводом от ДВС в качестве источника электропитания необходимо учитывать способность его выдерживать кратковременные перегрузки по току, возникающие при запуске асинхронных электродвигателей [10, 11, 14].

При выборе мощности электрогенератора необходимо учитывать, условие эффективного использования электроагрегата в процессе работы. Одним из показателей эффективности является коэффициент загрузки генераторного электроагрегата. Рекомендованная загрузка генераторного электроагрегата с приводом от двигателя внутреннего сгорания в длительном режиме работы составляет 80 % [12].

На основании изложенных факторов нами предложена математическая модель определения требуемой мощности генераторного электроагрегата для применения его в качестве источника питания для электродвигательной нагрузки [13]:

$$\begin{cases} S_{гном} \geq \sum_{i=1}^{n-p} \frac{K_{3.нi} \cdot P_{нi}}{\eta_{нi} \cdot \cos \varphi_{нi}} + \sum_{j=1}^p \frac{P_{рj} \cdot k_{Ij} \cdot k_{Uj}}{\eta_{нj} \cdot \cos \varphi_{нj} \cdot K_L \cdot k_Q}; \\ S_{гном} \geq \sum_{i=1}^n \frac{K_{3.нi} \cdot P_{нi}}{\eta_{нi} \cdot \cos \varphi_{нi} \cdot K_{3.г}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $P_{н}$ – мощность электроприёмников работающих в установившемся режиме, кВт; $P_{р}$ – мощность одновременно запускаемых электроприёмников, кВт; $\eta_{н}$ – коэффициент полезного действия электроприёмников; $\cos \varphi_{н}$ – номинальное значение коэффициента мощности электроприёмников; $K_{3.н}$ – коэффициент загрузки присоединенных электроприёмников, работающих в установившемся режиме; k_I – кратность пу-

ского тока присоединяемых электроприёмников; k_U – коэффициент учитывающий падение напряжения на зажимах электроприёмников; k_Q – коэффициент учитывающий возможность перегрузки генератора по току; K_L – коэффициент учитывающий перегрузочную способность первичного двигателя.

Математическая модель (1) описывает расчет требуемой мощности выбираемого генераторного электроагрегата, на основе параметров присоединяемых электроприемников, работающих как в длительном, так и в кратковременном режиме работы.

Рассмотрим потребителя, представляющего из себя узел нагрузки, состоящего из асинхронных электродвигателей, в качестве источника электроэнергии необходимо подобрать электрогенератор с приводом от ДВС. Об условимся тем, что в рассматриваемой автономной энергетической системе электродвигательная нагрузка представлена разным количеством и различной мощностью электродвигателей, а установленная мощность в целом узла нагрузки для всех вариантов исследования равна $P = 18,5$ кВт (см. таблицу).

Параметры узла нагрузки

Параметр	№ 1	№ 2	№ 3
Установленная мощность узла нагрузки, кВт	18,5	18,5	18,5
Номер электродвигателя	Мощность электродвигателя, кВт		
N1	7,5	7,5	5,5
N2	5,5	4	4
N3	4	2,2	3
N4	1,5	2,2	1,5
N5	–	1,5	2,2
N6	–	0,55	1,5
N7	–	0,55	0,55
N8	–	–	0,25

При одинаковой установленной мощности узла электродвигательной нагрузки, единичная мощность отдельных электроприемников может варьироваться. Так же имеет значение и очередность запуска электродвигателей. На рис. 1 приведены примеры пусковой мощности для узлов нагрузки в заданном порядке запуска из таблицы.

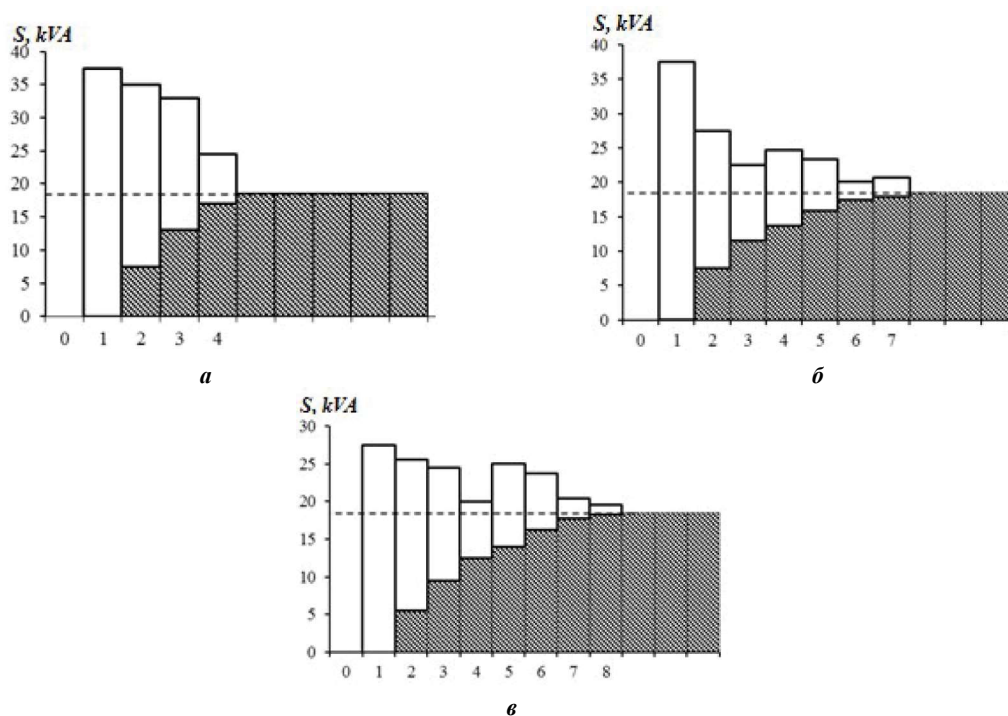


Рис. 1. Величины пусковой мощности электродвигателей для узла нагрузки:

а – узел нагрузки № 1; б – узел нагрузки № 2; в – узел нагрузки № 3

□ – величина пусковой мощности электродвигателя;
 ■ – потребляемая мощность в установившемся режиме работы

Анализ области решения системы неравенств (1) показал, что одним из ключевых, факторов соизмеримости является единичная мощность асинхронного электродвигателя. Этот фактор будет тем существеннее, чем меньше единиц нагрузки в узле и чем шире ряд их мощностей.

Кроме того, при большом количестве электроприёмников и незначительной разности мощностей между ними следует отсутствие соизмеримости мощностей электроприёмников к генератору, это подтверждается преобладанием решения второго неравенства системы (1) над первым.





Методика выбора генераторного электроагрегата по предлагаемой системе неравенств (1) предполагает проверку каждого запускаемого электродвигателя на успешность пуска, путем решения первого уравнения. Решение первого неравенства дает оценку возможности или не возможности прямого запуска электродвигателя, с учетом ранее присоединенной нагрузки, то есть оценивает возможность успешного запуска электродвигателя от питаемого генератора.

По второму уравнению неравенства (1) проводится проверка работы генератора в длительном режиме работы, при условии, когда все электроприемники работают в установившемся режиме.

После решения системы неравенств (1), определив необходимую мощность генераторного электроагрегата для исследуемого узла электродвигательной нагрузки, производится выбор ближайшего большего по мощности генераторного электроагрегата из предлагаемого производителями ряда номинальных мощностей. Далее для подобранного электроагрегата необходимо выполнить оценку эффективности работы на заданный узел нагрузки, с помощью коэффициента соизмеримости, выраженного соотношением (2):

$$K^* = \frac{S_{уст}}{S_{узн}} \cdot \overline{S}_{г\text{сop}}, \quad (2)$$

где $S_{узн}$ – полная мощность узла электродвигательной нагрузки, кВА; $S_{уст}$ – установленная мощность генераторного электроагрегата, кВА; $\overline{S}_{г\text{сop}}$ – длительная мощность генераторного электроагрегата в относительных единицах.

С учетом $\overline{S}_{г\text{сop}} = 0,8$, показатель загрузки генераторного электроагрегата можно записать в виде:

$$Z = K^{*-1} \cdot \overline{S}_{г\text{сop}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

На рис. 2 представлена зависимость связи коэффициента соизмеримости (K^*) от загрузки (Z) генераторного электроагрегата для установившегося режима работы.

Коэффициент соизмеримости показывает, прямую зависимость величины требуемой мощности генераторного электроагрегата от мощности узла нагрузки и энергоэффективность в процессе эксплуатации через параметр загрузки электроагрегата.

На графике представлена зависимость показателя загрузки генераторного электроагрегата от коэффициента соизмеримости. Область допустимых решений соответствующих загрузке $50\% \leq Z \leq 80\%$ составляет 1,0–1,6.

Если коэффициент соизмеримости равен $K^* = 1$ то загрузка в длительном режиме работы генераторного электроагрегата соответствует 80 %. При значении коэффициента соизмеримости $K^* < 1$ выбранная мощность генераторного электроагрегата может привести к перегрузке источника питания, что не рекомендовано в соответствии со стандартом ГОСТ Р 53987-2010.

При $K^* = 1,6$ загрузка генераторного электроагрегата составит 50%, что означает не рационального использования генераторного электроагрегата в длительном режиме, увеличение коэффициента соизмеримости $K^* > 1,6$ применительно к узлу нагрузки приведет к перерасходу топлива и не эффективной работе системы.

Для достижения заданного условия загрузки $50\% \leq Z \leq 80\%$ генераторного электроагрегата, необходимо ограничивать мгновенное значение потребляемой мощности при пуске асинхронных электродвигателей, влияющих на устойчивость и работоспособность системы, с помощью устройств снижения и компенсации реактивной мощности как отдельных так группы электроприёмников.

По шаговое изменение запуска электродвигателей даст возможность минимизировать капитальные вложения в автономный источник питания, за счет возможности запустить первыми более мощные электроприемники, которые обуславливают наибольшее влияние на устойчивость и работоспособность системы.

Заключение. В исследовании предлагается подход к выбору генераторного электроагрегата в качестве автономного источника питания для электроснабжения узла электродвигательной нагрузки на основе определения требуемой и достаточной мощности. Для повышения загрузки генераторного электроагрегата до уровня от 50 до 80 % в длительном режиме работы, предлагается выполнять оценку соизмеримости мощностей выбираемого генераторного электроагрегата и узла нагрузки. Чтобы обеспечить приемлемый уровень

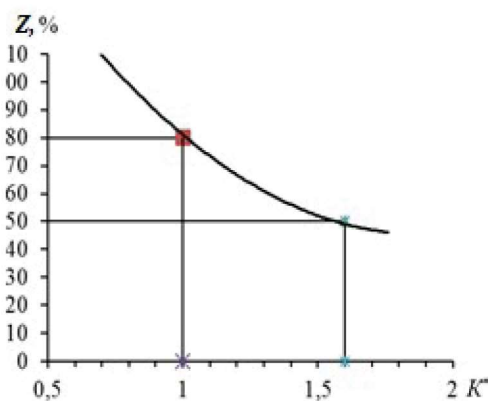


Рис. 2. Зависимость показателя загрузки генераторного электроагрегата от коэффициента соизмеримости

загрузки необходимо чтобы значение коэффициента соизмеримости составляло 1,0–1,6. Показатель коэффициента соизмеримости, не входящий в этот диапазон, свидетельствует о существенном влиянии пусковой мощности электродвигателей на требуемую мощность генераторного электроагрегата питающего узел нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atanov I.V., Khorol'skii V.Y., Ershov A.B., Yastrebov S.S. A Generalized Quality Index of a Self-Contained Power Supply System // *Russian Electrical Engineering*. 2018. Vol. 89. No. 7. P. 428–431.
2. Artyukhov I.I., Stepanov S.F., Molot S.V., Tulepova G.N., Erbaev E.T., Tulegenov K.K. Autonomous power supply system based on a diesel generator and renewable energy sources for remote rural areas / 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2018 - Proceedings 19. 2018. P. 1–4.
3. Barade Monika G., Roy Anindita Design and Optimization of Photovoltaic-Diesel Generator-Battery Hybrid System for Off-grid Areas // *International Journal of Current Engineering and Technology*. MIT College of Engineering. (Pune, India). MECHPGCON 2016, INPRESSCO ICET Special Issue-5 (June, 2016). P. 344–353.
4. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Выбор мощности генерирующего оборудования автономной солнечно-дизельной электростанции мегаваттного класса // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 4-0. С. 61–66.
5. Khorol'skii V.Y., Atanov I.V., Mastepanenko M.A., Sharipov I.K. Choice of the Method of Probabilistic Modeling of Statistical Dynamics of Autonomous Power Supply Systems // *Russian Electrical Engineering*. 2018. Vol. 89. No. 7. P. 425–427.
6. Changjie Y., Sechilariu M., Locment F. Diesel Generator Slow Start-up Compensation by Supercapacitor for DC Microgrid Power Balancing // *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. 2016. P. 1–6.
7. Стогов А.Ю., Беляев А.Н. Повышение динамической устойчивости автономной энергосистемы на основе управления по взаимным параметрам // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. № 21(1–2). С. 55–66.
8. Ербаев Е.Т., Степанов С.Ф., Артюхов И.И., Молотов С.В. Особенности построения автономной ветро-дизельной системы электроснабжения объектов с электроприемниками разного типа // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1–1. С. 121.
9. Артюхов И.И., Туполева Г.Н., Молот С.В. Особенности построения гибридных солнечно-дизельных комплексов для автономного электроснабжения удаленных сельских районов // *Вопросы электротехнологии*. 2019. № 2 (23). С. 81–90.
10. Глухарев В.А., Попов И.Н., Рыхлов С.Ю. Определения параметров дизель-генератора мини-ТЭС в автономных системах по условиям устойчивости // *Научное обозрение*. 2015. № 24. С. 163–166.
11. Капитонов О.К., Щедрин В.А. Влияние кратности возбуждения синхронных генераторов на работу узла нагрузки соизмеримой мощности // *Вестник Чувашского университета*. 2012. № 3. С. 121–126.
12. Попов И.Н., Рыхлов С.Ю. Обоснование мощности генерирующей установки автономного источника по структуре электрической нагрузки потребителя // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2014. № 3(76). С. 80–82.
13. Глухарев В.А., Попов И.Н., Верзилин А.А., Шляпников М.В. Определение мощности генератора источника электроснабжения в локальной энергетической системе // *Энергетик*. 2019. № 2. С. 16–18.
14. Choosing a Power Source of Autonomous Energy-Power Supply of Technological Processes with System Testing for Stability / V. A. Glukharev, D. A. Solov'yev, I. N. Popov, A. A. Verzhilin, D. V. Sivitsky // *HELIX*. 2019. Vol. 9. No. 4. P. 5133–5138.

REFERENCES

1. Atanov I.V., Khorol'skii V.Y., Ershov A.B., Yastrebov S.S. A Generalized Quality Index of a Self-Contained Power Supply System. *Russian Electrical Engineering*. 2018; 89; 7: 428–431.
2. Artyukhov I.I., Stepanov S.F., Molot S.V., Tulepova G.N., Erbaev E.T., Tulegenov K.K. Autonomous power supply system based on a diesel generator and renewable energy sources for remote rural areas / 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2018. Proceedings 19. 2018: 1–4.
3. Barade Monika G., Roy Anindita Design and Optimization of Photovoltaic-Diesel Generator-Battery Hybrid System for Off-grid Areas. *International Journal of Current Engineering and Technology*. MIT College of Engineering. (Pune, India). MECHPGCON 2016, INPRESSCO ICET; 5: 344–353.
4. Dmitrienko V.N., Lukutin B.V. The choice of capacity generation equipment Autonomous solar-diesel plant megawatt class. *Fundamental Research*. 2015; 4-0: 61–66.
5. Khorol'skii V.Y., Atanov I.V., Mastepanenko M.A., Sharipov I.K. Choice of the Method of Probabilistic Modeling of Statistical Dynamics of Autonomous Power Supply Systems. *Russian Electrical Engineering*. 2018; 89; 7: 425–427.
6. Changjie Y., Sechilariu M., Locment F. Diesel Generator Slow Start-up Compensation by Supercapacitor for DC Microgrid Power Balancing. *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. 2016: 1–6.
7. Stogov A.YU., Belyaev A.N. Improvement of transient stability of autonomous power system on basis of wide area control system. *Energy Sector Problems*. 2019; 21; 1–2: 55–66.
8. Erbaev E.T., Artyukhov I.I., Stepanov S.F., Molot S.V. Features of stand-alone wind-diesel power system construction with different type electrical receivers. *Modern problems of science and education*. 2015; 1–1: 121.
9. Artyukhov I.I., Tulepova G.N., Molot S.V. Characteristics of the solar-diesel hybrid systems for autonomous power supply of remote rural areas. *Journal of Electrotechnics*. 2019; 2 (23): 81–90.
10. Glukharev V. A., Rykhlov S. Yu., Popov I. N. Determination of the parameters of a diesel generator of a mini-HPP in autonomous systems on the basis of stability conditions. *Science Review*. 2015; 24: 163–166.
11. Kapitonov O.K., Shchedrin V.A. Running the engine power is commensurate in the autonomous system with a specific limit value excitation of the generator and load value. *Vestnik of the Chuvash University*. 2012; 3: 121–126.
12. Popov I.N., Ryhlov S.Yu. Assessing the capacity of independent generating units by the structure of consumer electric demand. *Vestnik of the Saratov State Technical University*. 2014; 3(76): 80–82.
13. Glukharev V. A., Popov I. N., Verzhilin A. A., Determination of the capacity of power supply source generator in local power system. *Energetic*. 2019; 2: 16–18.
14. Choosing a Power Source of Autonomous Energy-Power Supply of Technological Processes with System Testing for Stability / V. A. Glukharev, D. A. Solov'yev, I. N. Popov, A. A. Verzhilin, D. V. Sivitsky. *HELIX*. 2019; 9; 4: 5133–5138.

Статья поступила в редакцию 10.06.2023; одобрена после рецензирования 29.07.2023; принята к публикации 1.08.2023.
The article was submitted 10.06.2023; approved after reviewing 29.07.2023; accepted for publication 1.08.2023.

