

УДК 621.316.1

DOI 10.46960/2658-6754_2022_3_115

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ГОРОДСКОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ РЯДА ПЕРЕМЕННЫХ ФАКТОРОВ

С.Ш. Таваров

Южно-Уральский государственный университет
Челябинск, Россия

ORCID: 0000-0002-2875-2752 e-mail: tabarovsaid@mail.ru

Статья посвящена вопросам прогнозирования электропотребления бытовыми потребителями с учетом ряда переменных факторов и установления влияния этих факторов на режим работы городской электрической сети. Для определения влияния ряда переменных факторов на электропотребление бытовых потребителей предложен обобщенный коэффициент учета неопределенности, который позволяет дополнительно выявлять причины неравномерности нагрузки по фазам в часы максимума нагрузок. Установлено, что переменные факторы из-за отсутствия иных источников энергии (тепло-горячее водоснабжение и газоснабжение) оказывают существенное влияние на режим работы. Для оценки режима работы городской электрической сети предлагается построение в среде *Matlab* компьютерной модели с использованием исходных и определяемых параметров, на ее основе произвести моделирование режима работы электрической сети.

Ключевые слова: несимметрия, переменные факторы, режим работы, электрические сети.

Для цитирования: Таваров С.Ш. Моделирование режима работы городской распределительной электрической сети с учетом ряда переменных факторов // Интеллектуальная электротехника. 2022. № 3. С. 115-124.
DOI: 10.46960/2658-6754_2022_3_115

SIMULATION OF OPERATION MODE OF URBAN DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORK TAKING INTO ACCOUNT A SERIES OF VARIABLE FACTORS

S.Sh. Tavarov

South Ural State University
Chelyabinsk, Russia

ORCID: 0000-0002-2875-2752 e-mail: tabarovsaid@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the issue of forecasting electricity consumption by household consumers, taking into account a number of variable factors and establishing the influence of these factors on the mode of operation of the city electrical network. To determine the influence of a number of variable factors on the power consumption of household consumers, a generalized coefficient for accounting for uncertainty is proposed, which allows additionally identifying the causes of load unevenness by phases during hours of maximum load.

It has been established that variable factors due to the lack of other sources of energy (heat and hot water supply and gas supply) have a significant impact on the mode of operation. To assess the mode of operation of the city electrical network, it is proposed to build a computer model in the Matlab environment using the initial and determined parameters, on its basis to simulate the mode of operation of the electrical network.

Keywords: asymmetry, variable factors, mode of operation, electrical networks.

For citation: S.Sh. Tavarov, "Simulation of the operation mode of the urban distribution electric network taking into account a series of variable factors", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 115-124, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_3_115

I. Введение

Проблема прогнозирования электропотребления бытовыми потребителями в последнее годы в связи с динамикой его изменения приобретает все более важное значения для электроснабжающей организации. От точности прогноза зависит не только надежность, проявляющаяся в виде технического состояния элементов электрической сети и сроков их служб, но и эффективность – потери электроэнергии при ее распределении. Вопросами прогнозирования электропотребления занимаются, как в России [1-5], так и за рубежом [6, 7], используя различные подходы, способы и методы.

Режим работы электрических сетей, в частности городской электрической сети с коммунально-бытовыми потребителями, существенно отличается от электрических сетей промышленных предприятий. Это отличие сетей связано с использованием трехфазных электроприемников, тогда как в городских электрических сетях большую часть составляют однофазные электроприемники. Это отличие сказывается на режиме работы именуемых электрических сетей. В основном это проявляется в виде неравномерности электропотребления, приводящей к несимметрии токов и напряжений, а также появлению токов и напряжений на нулевом проводнике.

На основе проведенного анализа источников [1-7] установлены факторы, влияющие на прогнозирование электропотребления, а также предложены дополнительные факторы [8-10] с приведением их в обобщенный коэффициент учета факторов неопределенности.

К известным факторам можно отнести:

- метеорологические;
- учет конструктивного исполнения жилых домов;
- неравномерность нагрузки при распределении ее по фазам трехфазных линий и вводов.

К предлагаемым (дополнительным) факторам отнесем:

- учет перепада высот над уровнем моря;
- разное количество электроприемников у потребителя.

Установление зависимости от указанных выше переменных факторов неравномерности электропотребления является для городской электрической сети г. Душанбе весьма актуальным. Обусловлено это, в первую очередь, необходимостью уменьшения потерь электроэнергии и повышения надежности системы электроснабжения.

II. Теоретическая часть

На основе сказанного выше предлагается обобщенный коэффициент учета неопределенности при прогнозировании электропотребления бытовыми потребителями в виде (1):

$$a_i = ((t_i \cdot h + c) / (s + k)), \quad (1)$$

где t_i – температурный коэффициент (учитывающий метеорологический фактор); h – коэффициент, учитывающий расположенность потребителей над уровнем моря; c – коэффициент, учитывающий конструктивное исполнение жилого дома; s – коэффициент, учитывающий неравномерность нагрузки при распределении ее по фазам трехфазных линий и вводов вводно-распределительного устройства (ВРУ); k – коэффициент, учитывающий различное количество электроприемников у потребителя.

Уравнение (1) состоит из двух совокупных факторов: первый $(t_i \cdot h + c)$, характеризующий климата-метеорологический аспект и второй $(s + k)$, учитывающий экономический уровень потребителя.

Необходимо отметить, что коэффициенты s и k имеют динамичный характер и создают основную неопределенность в прогнозировании и создают неравномерности нагрузки по фазам. Коэффициент s принимаем в диапазоне от 0 до 1. Рост данного коэффициента говорит о возможности потребителя использовать максимальное количество бытовых электроприемников. Коэффициент k зависит от количества подключенных потребителей.

Методом отсеивания полученных данных коэффициент s был принят равным 1. Обоснованием этого является то, что потребители лишены иных источников энергии и вся нагрузка лежит на плече электрической энергии. Тем самым все рассматриваемые потребители (квартиры) обеспечены максимальным количеством электроприемниками.

На основе предложенного обобщенного коэффициента учета неопределенности в виде (2), предлагаем прогнозировать электропотребление бытовыми потребителями с его помощью:

$$W_{\text{прогноз}} = W_{\text{факт}} \cdot (1 - \alpha_i^2), \quad (2)$$

где $W_{\text{факт}}$ – фактическое электропотребления, кВт·ч.

На основе предлагаемого метода прогнозирования электропотребления (2) с учетом переменных факторов (обобщенного коэффициента учета неопределенности) (1) по данным месячного электропотребления в зимнее дни, для групп потребителей, подключенных к пяти потребительским трансформаторным подстанциям 6/0,4 кВ, получающих питание от одной ячейки подстанции «Авиатор» г. Душанбе были определены эквивалентные электрические нагрузки в часы максимума (рис. 1).

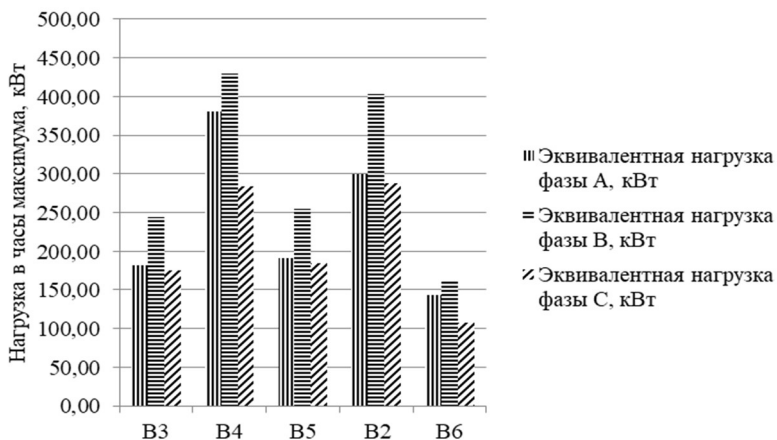


Рис. 1. Суммарная нагрузка в часы максимума для ТП В3-В6

Fig. 1. Total load during peak hours for TS V3-V6

Отметим, что основные неравномерности электропотребления наблюдаются в зимний период, вечерний и утренний максимумы.

Число потребителей (квартир), согласно обследованию, подключенных к каждой фазе составило:

- для ТП В3 – 20 потребителей (квартир);
- для ТП В4 – 53 потребителей (квартир);
- для ТП В5 – 20 потребителей (квартир);

- для ТП В6 – 20 потребителей (квартир);
- для ТП В2 – 33 потребителей (квартир).

Следует отметить, что согласно проведенным исследованиям, для данных участков электрической сети продолжительность вечернего максимума нагрузок составляла 3÷3,5 ч [9, 10].

Используя (1), найдем значения коэффициента, учитывающего переменные факторы – α ; значение которых лежат в диапазоне от 0,273 до 0,4286, что выше установленных значений Открытая акционерная холдинговая компания (ОАХК) «Барки Точик» для однофазных бытовых потребителей. На основании полученных результатов (рис. 1) было установлено, что относительная разница в нагрузке между фазами в часы максимума находится в пределах от 10,8 до 36,16 %, что также подтверждает неравномерность нагрузки по фазам в часы максимума.

Для оценки режима работы рассматриваемой электрической сети в среде *Matlab* была рассмотрена компьютерная модель. Все параметры рассматриваемых участков исследуемой электрической сети напряжением 6-0,4 кВ (марка, сечение и длины кабельных линии (КЛ), типы и мощности трансформаторных потребительских подстанции (ТПП) (ТП В2-В6)) соответствуют реальной электрической сети.

В табл. 1 приведены исходные данные этой сети.

Таблица 1.
Исходные данные моделируемой электрической сети

Table 1.
Initial data of the simulated electrical network

п/п	Наименование	В3	В4	В5	В6	В2
1	Тип и мощность ТПП	ТМ-400	ТМ-1000	ТМ-400	ТМ-400	ТМ-630
2	Марка и сечение, КЛ-0,4 кВ, мм ²	ААШв-4×150	ААШв-4×185	ААШв-4×185	ААШв-4×150	ААШв-4×185
3	Длина КЛ-0,4 кВ, м	220	300	280	350	347
участки						
п/п	Наименование	Яч.№8-В1	В1-В3	В2-В5	В3-В4	
1	Марка и сечение, КЛ-6 кВ, мм ²	АСБ-3×185	АСБ-3×240	АСБ-3×185	АСБ-3×185	
2	Длина КЛ-6 кВ, м	550	450	538	307	

На рис. 2 в виде блоков представлена компьютерная модель части городской электрической сети с заданными параметрами, соответствующими табл. 1, и подключенной суммарной нагрузкой в часы максимума по

фазам бытовых потребителей (рис. 1). При этом блок В1 соответствует источнику питания. Для пояснения содержания блоков в качестве примера на рис. 3 представлен участок В3 рассматриваемой части городской электрической сети.

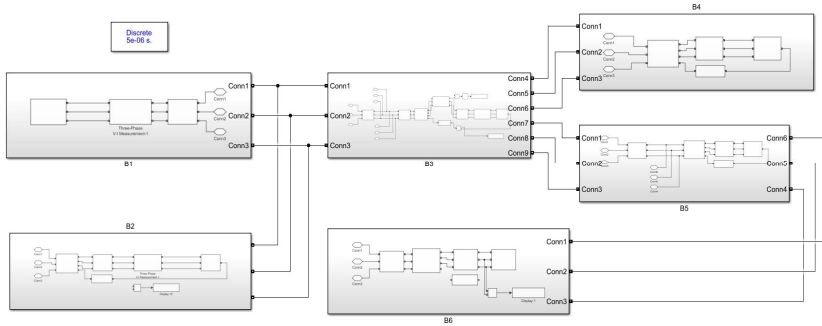


Рис. 2. Компьютерная модель части городской электрической сети в виде блоков (B1-B6)

Fig. 2. Computer model of a part of the city electrical network in the form of blocks (B1-B6)

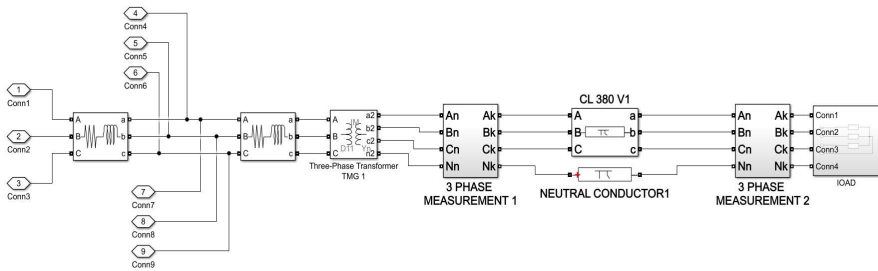


Рис. 3. Модель участка городской электрической сети

Fig. 3. Model of the section of the city electrical network

Согласно рис. 3, участок городской электрической сети состоит из питающего кабеля напряжением 6 кВ, понижающего потребительского трансформатора напряжением 6/0,4 кВ, питающего кабеля напряжением 0,4 кВ, измерительного прибора и суммарной однофазной электрической нагрузки. Все параметры как данного участка (рис. 3), так и всей рассматриваемой городской электрической сети (рис. 2), задавались в соответствии с вышеприведенными данными.

III. Практическая значимость, результаты и обсуждения

С применением построенной компьютерной модели городской электрической сети (рис. 2) с помощью измерительных приборов был оценен режим работы городской электрической сети при изменении переменных факторов. Режим работы городской электрической сети оценивался по следующим параметрам:

- напряжений фаз в часы максимума нагрузок;
- токи фаз в часы максимума нагрузок;
- токи прямой, обратной и нулевой последовательностей;
- напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Результаты моделирования режима работы в часы максимума нагрузок, полученные в среде *Matlab* с помощью измерительных приборов, представлены в табл. 2. Они подтверждают влияния переменных факторов, определяемые с использованием (1) на режимы работы городской электрической сети. Доказательством является превышение отклонения напряжения от допустимых величин, которые для сети 220 В находятся в пределах от 198 до 242 В, и появлением токов в нулевом проводе.

Таким образом, при разработке способов контроля и управления режимами работы городских электрических сетей в условиях не только г. Душанбе, но и всей Республики Таджикистан, необходимо учитывать переменные факторы, которые приведены и описаны в работе. Учитывая значительное отличие других районов и городов Республики Таджикистан от г. Душанбе, переменные факторы, по нашему мнению, будут намного сильнее влиять на режимы работы их городских электрических сетей.

IV. Заключение

По данным электропотребления бытовых потребителей, в часы максимума нагрузок и с учетом коэффициента переменных факторов, создающих дополнительные неравномерности нагрузки, были определены нагрузки по фазам в часы максимума нагрузок.

Установлено, что переменные факторы из-за отсутствия иных источников энергии (тепло-горячее водоснабжение и газоснабжение) оказывают существенное влияние на режим работы. Для оценки режима работы городской электрической сети в среде *Matlab* была построена компьютерная модель, с помощью которой произведено моделирование режима работы электрической сети. Результаты моделирования режима работы городской электрической сети подтвердили влияние переменных факторов на ее режим работы, в особенности, в часы максимума нагрузок представлены в табл. 2.

Таблица 2.
Результаты моделирования режима работы
в часы максимума нагрузок

Table 2.
The results of simulation of the operating mode
during hours of maximum load

п/п	Наименование		В3	В4	В5	В6	В2
1	Напряжений фаз в часы максимума нагрузок, В	фаза А	198,9	157,6	197,5	184,9	167,2
		фаза В	173,1	144,9	171,1	173,6	138,8
		фаза С	200,7	182,6	199,2	207,7	168,6
2	Токи фаз в часы максимума нагрузок, А	фаза А	745,6	1242	740,3	549,7	1034
		фаза В	874,4	1287	864,2	581,7	1156
		фаза С	724,7	1072	719	460,3	1004
3	Токи прямой, обратной и нулевой последовательностей, А	I_1	781,1	1199	774,1	530,1	1064
		I_2	64,24	100,6	62,97	51,45	71,33
		I_0	30,27	30,22	28,55	21,29	23,05
4	Напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей, В	U_1	190,8	161,6	189,1	188,6	158,1
		U_2	4,56	7,08	4,71	5,44	5,97
		U_0	13,45	15,32	13,67	14,93	13,56

© Таваров С.Ш., 2022

Поступила в редакцию 15.06.2022

Received 15.06.2022

Библиографический список

- [1] Репкина Н.Г. Исследование факторов, влияющих на точность прогнозирования суточного электропотребления // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 2. С. 41–43. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-2-41-43
- [2] Зубакин В.А., Ковшов Н.М. Методы и модели анализа волатильности потребления электроэнергии с учетом цикличности и стохастичности // Стратегии бизнеса. 2015. № 7 (15). С. 24-29.
- [3] Макоклыев Б.И., Костиков В.Н. Моделирование электрических нагрузок электроэнергетических систем // Электричество. 1994. № 10. С. 6–18.
- [4] Макоклыев Б.И., Павликов В.С., Владимиров А.И. Влияние колебаний метеорологических факторов на электропотребление энергообъединений // Энергетик. 2003. № 6. С. 11–23.
- [5] Валеев Г.С., Дзюба М.А., Валеев Р.Г. Моделирование суточных графиков нагрузок участков распределительных сетей напряжением 6–10 кВ городов и населенных пунктов в условиях ограниченного объема исходной информации

- // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т. 16. № 2. С. 23–29. DOI: 10.14529/power160203
- [6] Yahia Z., Pradhan A. An optimal load schedule of household appliances with leveled load profile and consumer's preferences // proc. 2018 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE), Apr. 3-5, 2018, Cape Town, South Africa. IEEE, 2018. P. 1-7. DOI: 10.23919/DUE.2018.8384382
- [7] Yahia Z., Kholopane P. A binary integer programming model for optimal load scheduling of household appliances with consumer's preferences // proc. 2018 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE), Apr. 3-5, 2018, Cape Town, South Africa: IEEE, 2018. P. 1-8. DOI: 10.23919/DUE.2018.8384381
- [8] Tavarov S.Sh., Sidorov A.I., Kalegina Y.V. Model and algorithm of electricity consumption management for household consumers in the republic of Tajikistan // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2020. Vol. 7. No. 4. P. 520-526. DOI: 10.18280/mmep.070403
- [9] Таваров С.Ш. Метод прогнозирования электропотребления бытовыми потребителями в условиях Республики Таджикистан // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20. № 2. С. 28–35. DOI: 10.14529/power200203
- [10] Таваров С.Ш. Алгоритм обучения искусственной нейронной сети для факторного прогнозирования электропотребления бытового сектора // Электричество. 2022. № 3. С.30–38. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-3-30-38

References

- [1] N.G. Repkina, “Research of factors affecting the accuracy prediction daily power consumption”, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika \ Russian Electromechanics*, no. 2, pp. 41-43, 2015. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-2-41-43
- [2] V.A. Zubakin and N.M. Kovshov, “Methods and analysis models of electricity consumption in view of cyclicity and stochastics”, *Business Strategies*, no. 7 (15), pp. 24-29, 2015.
- [3] B.I. Makoklyuev and V.N. Kostikov, “Modelirovanie elektricheskikh nagruzok elektroenergeticheskikh sistem [Simulation of electrical loads of electric power systems “Modeling of electrical loads of electric power systems]”, *Elektrichestvo*, no. 10, pp. 6-18, 1994 (in Russian).
- [4] B.I. Makoklyuev, V.S. Pavlikov and A.I. Vladimirov, “Vliyaniye kolebanij meteorologicheskikh faktorov na elektropotrebleniye energoob"edinenij [Influence of fluctuations of meteorological factors on the power consumption of power associations]”, *Energetik*, no. 6, pp. 11-23, 2003 (in Russian).
- [5] G.S. Valeev, M.A. Dzyuba and R.G. Valeev “Modeling daily load curves of the elements of 6-10 kv urban power distribution networks under conditions of limited input information”, *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 23–29, 2016. DOI: 10.14529/power160203
- [6] Z. Yahia and A. Pradhan, “An optimal load schedule of household appliances with leveled load profile and consumer's preferences”, in proc. 2018 International Con-

- ference on the Domestic Use of Energy (DUE)*, Apr. 3-5, 2018, Cape Town, South Africa, pp. 1-7. DOI: 10.23919/DUE.2018.8384382
- [7] Z. Yahia and P. Kholopane, "A binary integer programming model for optimal load scheduling of household appliances with consumer's preferences", in proc. *2018 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)*, Apr. 3-5, 2018, Cape Town, South Africa, pp. 1-8. DOI: 10.23919/DUE.2018.8384381
- [8] S.Sh. Tavarov, A.I. Sidorov and Y.V. Kalegina, "Model and algorithm of electricity consumption management for household consumers in the republic of Tajikistan", *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 7, no. 4, pp. 520-526, 2020. DOI: 10.18280/mmep.070403
- [9] S.Sh. Tavarov "Method for projecting household electricity consumption in the republic of Tajikistan", *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 28–35, 2020. DOI: 10.14529/power200203
- [10] S.Sh. Tavarov "Artificial neural network training algorithm for factor-based prediction of electricity consumption in the household sector", *Elektrichestvo*, no. 3, pp. 30-38, 2022. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-3-30-38

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Таваров Саиджон Ширалиевич, кандидат технических наук, доцент Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск, Российская Федерация

Saidjon Sh. Tavarov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation