

analiza [Planning quality improvement of energy consumption on the basis of static analysis]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1992, no. 5, pp.12 – 16.

3. Belan A.V., Gordeev V.I., Demura A.V., Nadtoka I.I. *Puti i rezultaty sovershenstvovaniya metodov prognozirovaniya elektropotrebleniya* [Ways and results of improvement of energy consumption forecasting methods]. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 1993, no. 9–10, pp. 23-26.

4. Ajvazjan S.A., Mhitarjan V.S. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki* [Applied statistics and fundamentals of econometrics]. Moscow: Unity, 1998, 1022 p.

5. Shuckij V.I., Kuznetsov E.A., Tokareva N.M., Fishhuk S.A. Analiz i prognozirovanie energopotrebleniya v Murmanskoy oblasti [Analysis and forecasting of energy consumption in Murmansk region]. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 1998, no.10, pp. 5-9.

6. Bortsov Ju.A., Poljahov N. D., Prihodko I.A., Anushina E.S. Ispolzovanie sovremennyh podhodov i metodov dlja prognozirovaniya elektropotrebleniya [Application of advanced approaches and methods of energy consumption forecasting]. *Elektrotehnika* [Electrical power engineering]. 2006, no.8, pp.30-35.

7. Kudrin B.I. *Metodika obespecheniya pochasovogo prognozirovaniya elektropotrebleniya predpriyatij s uchetom*

pogodnyh faktorov [Method of hourly forecast of enterprise power consumption taking into account weather conditions]. *Vestnik MEI* [Bulletin of MPEI]. 2007, no.2, pp.105-108.

8. Nikiforov G.V. Sovershenstvovanie normirovaniya i planirovaniya elektropotrebleniya v promyshlennom proizvodstve [Improvement of power consumption control and planning in industrial production]. *Industrial power engineering*, 1999, no 3, pp.27-29.

9. Nikiforov G. V. [Analiz ustojchivosti regressionnyh modelej elektropotrebleniya] Analysis of stability for regression models of energy consumption. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 1999, no.12, pp.18-20.

10. Voronov I.V., Poletov Ye.A., Yremenko V.M. Opredelenie parametrov, vlijajushhih na elektropotreblenie promyshlennogo predpriyatija s pomoshchju metoda ekspertnyh otsenok [Determination of parameters influencing power consumption of industrial enterprises using expert evaluation method]. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of KuzGTU]. 2009, no.5, pp. 61-64.

11. Gracheva E.I., Saitbatalova R.S. Opredelenie rashoda elektroenergii na osnove matematicheskoj modeli [Calculation of electric power consumption on the basis of mathematical model]. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 1999, no.4, pp. 24-25.

УДК 621.316.11

Малафеев А.В., Крубцова А.А.

ПЛАНИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Статья посвящена краткосрочному и среднесрочному планированию режима системы электроснабжения металлургического предприятия на примере ОАО «ММК». Прогнозирование электрических нагрузок производственных подразделений предлагается осуществлять на основе теории нечетких множеств. На основе прогнозных графиков нагрузки выполнены расчеты основных параметров режима для периодов планирования от суток до года с различными интервалами осреднения. По результатам сопоставления параметров режима, соответствующих зарегистрированным и расчетным графикам, оценена погрешность предлагаемого подхода и сделан вывод о его применимости.

Ключевые слова: система электроснабжения, планирование режима, период планирования, неопределенность информации, электрические нагрузки, нечеткие интервалы, функция принадлежности, интервал осреднения графика.

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью графиков нагрузки металлургических предприятий на уровне 6-10 кВ является неоднозначность вероятностных характеристик, что делает неприемлемым использование для анализа режимов величин, связанных с нормальным законом распределения.

Таким образом, актуальность статьи определяется необходимостью планирования краткосрочных режимов внутриводских сетей с целью снижения потерь электроэнергии, ограничения загрузки оборудования, поддержания напряжения в заданных пределах при отсутствии полной информации о прогнозируемых величинах электрических нагрузок в узлах сети 6-10 кВ. Для учета неопределенности электрических нагрузок в работе предлагается использовать аппарат теории нечетких множеств.

В качестве объекта исследования были выбраны системы электроснабжения подразделений ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» – районы доменного, сортового цехов, ЛПЦ-5, ЛПЦ-8, кислородной станции №5.

В настоящей работе для оценки возможности использования теории нечетких множеств для планирования режимов системы электроснабжения на различные периоды времени решены следующие задачи:

- проведено исследование упорядоченных графиков основных параметров режима как нечетких интервалов на характер функции принадлежности;
- осуществлены расчеты параметров режима системы электроснабжения на примере исследуемых объектов с интервалами осреднения 3 мин., полчаса, час
- при краткосрочном планировании и 1 сутки,

1 месяц – при среднесрочном планировании;
– определена погрешность расчета параметров режима при использовании выбранной функции принадлежности для оценки адекватности предлагаемого подхода.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ ИНТЕРВАЛОВ
ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ

Использование нечетких интервалов для определения графиков нагрузки допускает аналитическое представление в виде некоторого простого математического выражения. В теории нечетких множеств построение функции принадлежности по распределению результатов наблюдений аналогично функции распределения случайной величины и осуществляется по выборке экспериментальных данных. В качестве лингвистической переменной [1] можно принять активную нагрузку системы электроснабжения ОАО «ММК». Примем допущение, что tgφ всех фидеров подстанции равны.

При планировании эксплуатационных режимов систем электроснабжения металлургических предприятий весьма важным является учет планового объема заказов на готовую продукцию и связанный с этим объем производства по основным переделам. Объем продукции и характер технологического процесса являются решающими факторами при формировании прогнозных графиков нагрузки. Технологические процессы цехов ОАО «ММК» достаточно разнообразны, что обуславливает разные технологические процессы и разный характер электрических нагрузок, которые, в свою очередь, тесно связаны с объемом производства готовой продукции.

С целью планирования параметров режима графики нагрузки целесообразно разделить на пять характерных областей, соответствующих различной производительности цехов, а именно:

- 1) режим наименьших нагрузок для интервала $[P_{min}, P_1]$;
- 2) режим малых нагрузок для интервала $[P_1, P_2]$;
- 3) режим средних нагрузок для интервала $[P_2, P_3]$;
- 4) режим больших нагрузок для интервала $[P_3, P_4]$;
- 5) режим наибольших нагрузок для интервала $[P_4, P_{max}]$.

Упорядоченный график электрических нагрузок в виде нечеткого интервала с нанесенными термами, соответствующими пяти указанным режимам, показан на рис. 1.



Рис. 1. К определению лингвистической переменной «активная мощность»

Графики электрических нагрузок металлургического предприятия, упорядоченные по убыванию, практически во всех случаях схожи с Z-образной функцией принадлежности [2]. На рис. 2 в качестве примера приведены графики нагрузки доменного цеха.

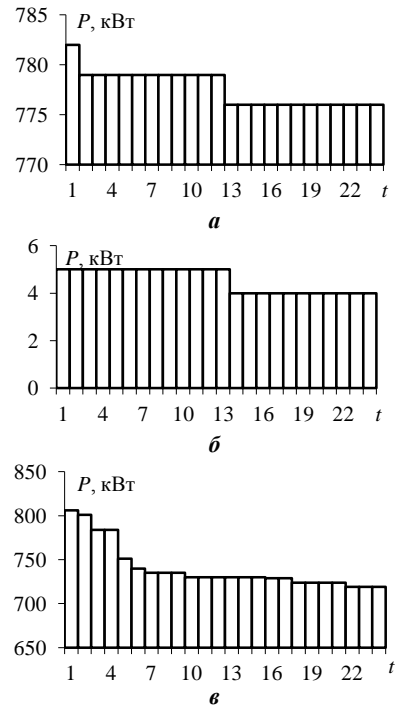


Рис. 2. Упорядоченные графики суточной нагрузки фидеров подстанции №2:
а - 2-31; б - 2-34; в - 2-48

Для оценки возможности применения Z-образной функции принадлежности для планирования краткосрочных и среднесрочных режимов в системе электроснабжения с целью снижения потерь электроэнергии, ограничения загрузки оборудования, поддержания напряжения в заданных пределах при отсутствии полной информации о прогнозируемых величинах сравним реальные графики нагрузок с графиками, рассчитанными с помощью Z-образной функции принадлежности.

Для наглядного представления схожести графиков электрических нагрузок с Z-образной функцией принадлежности на рис. 3 в одних осях показаны реальный и расчетный графики.

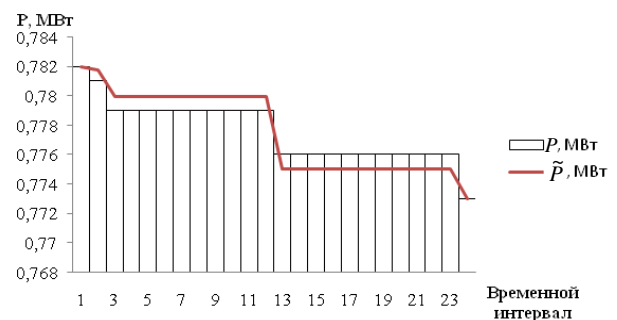


Рис. 3. Совмещенный график Z-образной функции принадлежности и нагрузки фидера 2-31 подстанции №2 в упорядоченной форме

Применительно к случайной величине электрической нагрузки функция принадлежности выглядит следующим образом [1]:

$$\mu_Z(P_i; P_{\min}, P_{\max}) = \begin{cases} 1, & P_i \leq P_{\min} \\ 1 - 2 \left(\frac{P_i - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \right)^2, & P_{\min} < P_i \leq \frac{P_{\min} + P_{\max}}{2} \\ 2 \left(\frac{P_{\max} - P_i}{P_{\max} - P_{\min}} \right)^2, & \frac{P_{\min} + P_{\max}}{2} < P_i < P_{\max} \\ 0, & P_{\max} \leq P_i \end{cases} \quad (1)$$

где P_{\max} – максимальная активная мощность; P_{\min} – минимальная активная мощность; P_i – текущее значение активной мощности.

Для расчета графиков нагрузки как нечетких интервалов было принято выражение

$$\tilde{P} = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min}) \cdot r_P(P_i). \quad (2)$$

где \tilde{P} – нечеткая величина электрической нагрузки; r_P – коэффициент соответствия между лингвистическим и числовым значениями нагрузки.

Замена реальных графиков нагрузки их нечеткими интервалами позволяет определить нечеткие интервалы для параметров режима системы электроснабжения.

Для выявления характера функции принадлежности без привязки к конкретному технологическому процессу предлагается использовать коэффициент характера функции принадлежности

$$k_{\text{хфп}} = k_{\text{зп}} \cdot k_{\text{фг}} = \frac{P_{\text{с.к}}}{P_{\text{max}}}. \quad (3)$$

Как показывают расчеты, если коэффициент характера функции принадлежности больше 0,5, то для планирования электрических нагрузок в сетях металлургических предприятий целесообразно применять Z-образную функцию принадлежности в соответствии с выражением (2).

Если коэффициент характера функции принадлежности меньше 0,5, то для корректного использования Z-образной функции принадлежности при планировании графиков электрических нагрузок по активной мощности целесообразно скорректировать выражение для Z-образной функции принадлежности с учетом 10-процентной погрешности расчета графика электрической нагрузки следующим образом:

$$k_{\text{кр}} = \begin{cases} (P_{\max} - P_{\min}) / P_{\min}, & P_{\min} < P_i < P_{\max} \\ 0, & P_i = P_{\min} \\ 1, & P_i = P_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

$$\tilde{P}_{\text{кр}} = \tilde{P} \cdot k_{\text{кр}}. \quad (5)$$

Расчетные значения ступеней графика нагрузки

с учетом рассмотренной корректировки на примере одного из присоединений ПС-31а приведены в табл. 1, графики показаны на рис. 4.

Таблица 1
Результаты расчета ординат скорректированного графика электрических нагрузок на примере фидера 31а-03 ПС № 31а ОАО «ММК»

Временные интервалы	P , кВт	μ	$\Delta\tilde{P}$, кВт	$k_{\text{кр}}$	$\Delta\tilde{P}_{\text{кр}}$, кВт	P , %
00:00	41	0,0000	45	1,0994	49	1,000
02:00	24	0,4132	26	1,0994	28	1,171
04:00	24	0,4132	26	1,0994	28	1,171
06:00	21	0,5868	23	1,0994	25	1,016
08:00	17	0,7356	19	1,0994	21	0,859
10:00	14	0,8514	15	1,0994	21	0,725
12:00	14	0,8514	15	1,0994	21	0,725
14:00	10	0,9338	11	1,0994	12	0,633
16:00	10	0,9338	11	1,0994	12	0,633
18:00	10	0,9338	11	1,0994	12	0,633
20:00	7	0,9835	8	1,0994	5	0,650
22:00	7	0,9835	8	1,0994	5	0,650
23:00	3	1	4	1,0994	4	1

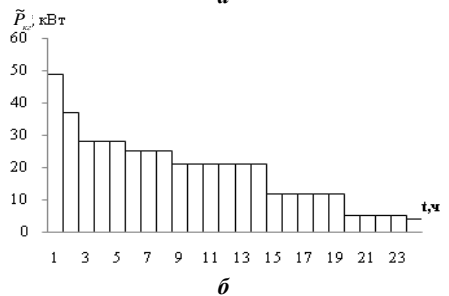
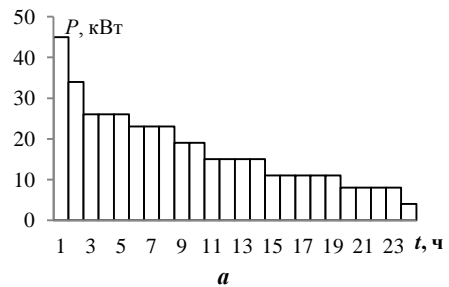


Рис. 4. Графики электрических нагрузок на примере фидера 31а-03 ПС 31а ОАО «ММК»: а - реальный; б - скорректированный расчетный

Как видно из табл. 2, для сортового цеха целесообразно корректировать расчетные графики на-

грузки, так как $k_{хфп}$ для него менее 0,5.

тервалом 1 мес.

Таблица 2
Результаты расчета коэффициента характера функции принадлежности

Цех	$k_{хфп}$
Доменный цех	0,961
Сортовой цех	0,331
ЛПЦ-5	0,854
ЛПЦ-8	0,895
Кислородная станция №5	0,892

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА

Для расчета параметров режима использован программный комплекс КАТРАН [3], разработанный на кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова. Для оценки адекватности предлагаемого подхода целесообразно рассчитать погрешность расчета параметров режима с интервалами осреднения 3 мин, полчаса, час применительно к краткосрочному планированию, а также сутки и месяц – к среднесрочному планированию.

Погрешность расчета параметров режима находилась как разность расчетных параметров, определяемых по замеренным графикам нагрузки, и графикам нагрузки, заданных при помощи предложенного математического аппарата (табл. 3).

На рис. 5, 6 приведены графики потерь активной мощности при краткосрочном и среднесрочном планировании [4, 5] на сутки, месяц и год. Суточные графики построены для интервалов осреднения 3 мин, 30 мин и 1 ч, месячный график построен для интервала осреднения 1 сут, годовой график – с ин-

Таблица 3
Расчетные потери активной мощности в системе электроснабжения доменного цеха с использованием Z-образной функции принадлежности для краткосрочного планирования с интервалом осреднения 1 ч

Временные интервалы	ΔP , МВт	$\mu(\Delta P)$	$\Delta \tilde{P}$, МВт	$\mu(\Delta \tilde{P})$	$\delta(\Delta P)$, МВт	$\delta(\Delta P)$, %
0	1,227	0	1,227	0	0	0
2	1,171	0,17	1,194	0,12	-0,00211	-0,72
4	1,159	0,24	1,180	0,19	-0,00192	-0,66
6	1,142	0,38	1,152	0,34	-0,00131	-0,46
8	1,122	0,57	1,115	0,57	0	0
10	1,112	0,66	1,098	0,67	0,00034	0,12
12	1,101	0,75	1,081	0,76	0,00062	0,23
14	1,093	0,80	1,071	0,82	0,00091	0,33
16	1,065	0,94	1,043	0,95	0,00095	0,36
18	1,054	0,97	1,037	0,98	0,001265	0,48
20	1,044	0,99	1,033	0,99	0,00392	1,50
22	1,036	1,00	1,032	1,00	0,01182	1,61
23	1,032	1	1,032	1	0	0

Графики потерь активной мощности с интервалом осреднения 3 мин визуально можно разделить на несколько линейных отрезков, соответственно при использовании Z-образной функции принадлежности, не являющейся линейной, имеет место погрешность. Для доменного цеха ОАО «ММК» погрешность расчета потерь активной мощности не превысила 4%: для суточных графиков с интервалом 3 мин – 1,88%, полчаса – 3,4%, час – 1,62%, для месячных графиков – 2,27%, для годовых графиков – 2,05%.

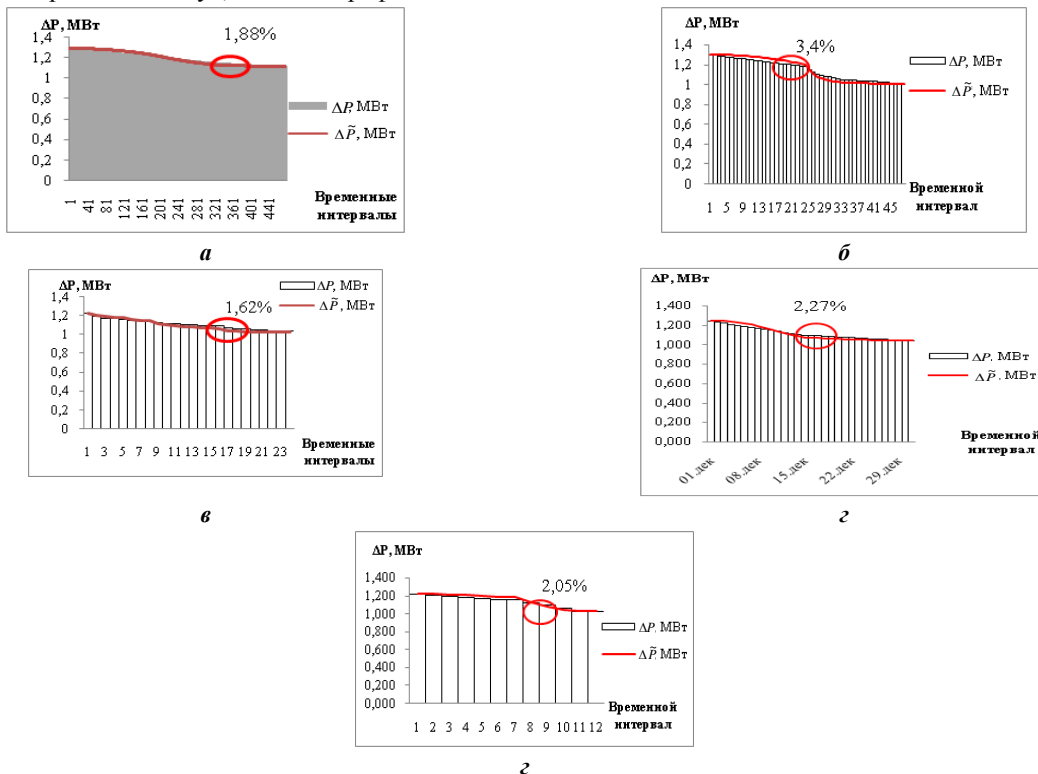


Рис. 5. Расчетные потери активной мощности в системе электроснабжения доменного цеха с интервалами осреднения: а - 3 минуты; б - полчаса; в - час; г - сутки; д - месяц

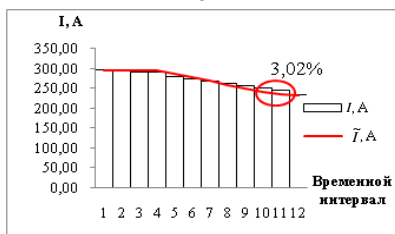
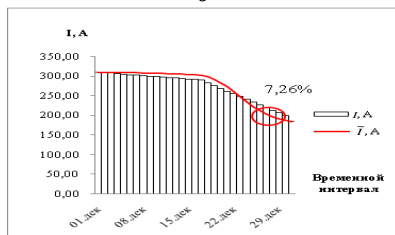
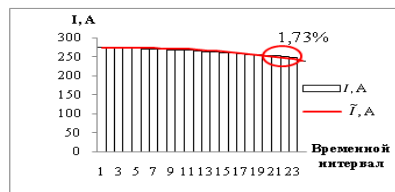
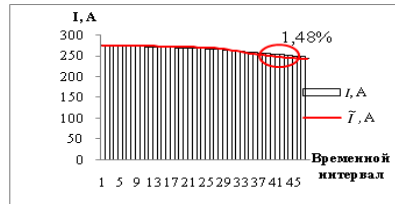
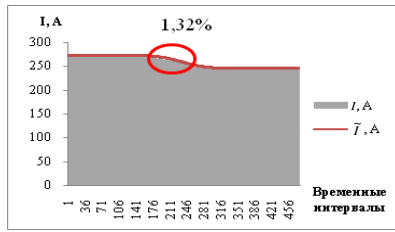


Рис. 6. Расчетный ток для ф.2-31 в системе электроснабжения доменного цеха с интервалами осреднения:

а - 3 минуты; б - пол часа; в - час; г - сутки; д - месяц

Для доменного цеха погрешность расчета токовой нагрузки не превысила 8%: для суточных графиков с интервалом осреднения 3 мин – 1,32%, пол часа – 1,48%, час – 1,73%, для месячных графиков – 7,26%, для годовых графиков – 3,02%.

Графики напряжений, полученные по расчетным графикам нагрузки, практически не отличаются от графиков, рассчитанных по замеренным нагрузкам. Так, для доменного цеха ОАО «ММК» погрешность расчета напряжения не превысила 1%: для суточных графиков с интервалом осреднения 3 мин – 0,09%, пол часа – 0,13%, час – 0,24%; для месячных графиков – 0,75%, для годовых графиков – 0,89%. Результаты расчета погрешности сведены в табл. 4–6.

Таблица 4
Систематическая погрешность расчета потерь активной мощности для цехов ОАО «ММК», %

Цех	Краткосрочное планирование режима на сутки			Среднесрочное планирование режима	
	3 мин	Пол- часа	Час	На месяц; интервал осреднения – сутки	На год; интервал осреднения – месяц
Доменный цех	1,88	3,4	1,62	2,27	2,05
Сортовой цех	0,7	7,15	1,44	4,77	1,46
Кислородная станция № 5	0,44	7,01	0,83	6,36	2,22
ЛПЦ-5	0,84	4,59	1,82	0,33	0,31
ЛПЦ-8	0,843	1,43	0,95	2,4	2,4

Таблица 5
Систематическая погрешность расчета токовой нагрузки для цеховых подстанций ОАО «ММК», %

Цех	Краткосрочное планирование режима на сутки			Среднесрочное планирование режима	
	3 мин	Пол- часа	Час	На месяц; интервал осреднения – сутки	На год; интервал осреднения – месяц
Доменный цех, ф.2-31	1,32	1,48	1,73	7,26	3,02
Сортовой цех, ф.64-24	6,67	9	8,7	3,15	0,94
Кислородная станция № 5, ф.86-01	0,33	0,54	0,38	4,7	4,1
ЛПЦ-5, ф.94-25	7,61	6,93	5,83	8,22	3,76
ЛПЦ-8, ф.88-13	8,8	2,63	4,9	9,52	4,78

Таблица 6
Систематическая погрешность расчета напряжения на шинах цеховых подстанций, %

Цех	Краткосрочное планирование режима на сутки			Среднесрочное планирование режима	
	3 мин	Пол- часа	Час	На месяц; интервал осреднения – сутки	На год; интервал осреднения – месяц
Доменный цех, ПС-2	0,09	0,13	0,24	0,89	0,75
Сортовой цех, ПС-64	0,41	0,11	0,11	0,28	0,26
Кислородная станция №5, ПС-86	0,02	0,65	0,62	0,94	0,52
ЛПЦ-5, ПС-94	0,086	0,21	0,37	0,14	0,11
ЛПЦ-8, ПС-88	0,05	0,59	0,92	0,2	0,2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе предложен аппарат теории нечетких множеств для математического представления графиков электрических нагрузок металлургического предприятия на примере ОАО «ММК» при планировании режимов системы электроснабжения на

период от суток до года.

2. Выявлены обобщенные показатели графиков нагрузки, позволяющие определить характер функции принадлежности без привязки к конкретному производственному процессу. Результаты расчета показали, что целесообразно для цеха улавливания и переработки химических продуктов, сортового цеха, ЛПЦ-10, ККЦ осуществлять корректировку расчетных графиков электрических нагрузок, полученных при помощи Z-образной функции принадлежности, для других цехов этого делать не требуется.

3. Расчеты режимов системы электроснабжения ОАО «ММК» при использовании предлагаемого математического аппарата для различных интервалов планирования и различных интервалов осреднения прогнозных графиков нагрузки показали, что наименьшую погрешность расчета параметров режима для краткосрочного планирования дают графики с 3-минутным интервалом осреднения (для большинства цехов – не более 2%). Наибольшая погрешность при использовании графиков с различными интервалами осреднения не превысила 10%. Погрешность расчета параметров режима при среднесрочном планировании также не превысила 10%, что допустимо в рамках решаемой задачи.

4. На основании выполненных исследований можно сделать вывод, что представление графиков электрических нагрузок в виде нечетких интервалов

с Z-образной функцией принадлежности не вносит существенных погрешностей в расчеты установившихся режимов и применительно к металлургическим предприятиям может быть использовано как при краткосрочном, так и при среднесрочном планировании эксплуатационных режимов систем электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конышева Л.К., Назаров Д.М. Основы теории нечетких множеств: учеб. пособие. СПб.: Питер, 2011. 192 с.
2. Малафеев А.В., Антоненко А.А. Математическое представление электрических нагрузок промышленных предприятий в задаче определения потерь электроэнергии с использованием аппарата теории нечетких множеств // Промышленная энергетика. 2013. №1. С. 9-13.
3. А.с. 2012612069 РФ. Программа «Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 6.0»/ В.А. Игуменшев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова, Е.А. Панова, А.В. Хламова, В.М. Тарасов, Е.Б. Ягольникова, Н.А. Николаев, В.В. Зиновьев. // Программы для ЭВМ, БД, ТИМС. 2012. №2. С. 500-501.
4. Parmar J. Total Losses in Power Distribution and Transmission Lines (Part 1). Gujarat, 2013. Mode of access: <http://electrical-engineering-portal.com/total-losses-in-power-distribution-and-transmission-lines-1>, free. Title from screen.
5. Parmar J. Total Losses in Power Distribution and Transmission Lines (Part 2). Gujarat, 2014. Mode of access: <http://electrical-engineering-portal.com/total-losses-in-power-distribution-and-transmission-lines-1>, free. Title from screen.

INFORMATION IN ENGLISH

POWER SUPPLY SYSTEM OPERATION PLANNING OF METALLURGICAL ENTERPRISE BASED ON FUZZY SETS THEORY

Malafeev A.V., Krubtsova A.A.

The paper is devoted to the short-term and medium-term planning mode of power supply system at a metallurgical plant and OJSC "MMK" is taken as an example. It is suggested to implement electric load forecasting for various production departments on the basis of the theory of fuzzy sets. On the basis of the forecast load graphics the authors calculated the basic mode parameters for planning periods from days to years at various intervals of averaging. By comparing the results of the mode parameters, corresponding to the registered and calculated graphics, they estimated the error of the proposed approach and came to the conclusion of its applicability.

Keywords: power supply system, mode planning, planning period, information uncertainty, electric loads, fuzzy intervals, membership function, graphic averaging interval.

REFERENCES

1. Konyshcheva L.K., Nazarov D.M. *Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv* [Fundamentals of the fuzzy sets theory]: study guide. Saint-Petersburg: Peter, 2011. 192 p.
2. Malafeev A.V., Antonenko A.A. *Matematicheskoe predstavlenie elektricheskikh nagruzok promyshlennykh predpriyatii v zadache opredeleniya poter elektroenergii s*

ispolzovaniem apparata teorii nechetkikh mnozhestv [Mathematical representation of electrical loads of industrial enterprises in the problem of determining electric power losses using the apparatus of the fuzzy sets theory]. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2013, no.1, pp. 9-13.

3. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Y.N., Panova E.A., Khlamova A.V., Tarasov V.M., Yagolnikova E.B., Nikolaev N.A., Zinovyev V.V. Author's certificate No. 2012612069 Russian Federation. The program "The Complex of Automated Mode Analysis KATRAN 6.0". – Published in bul. "Computer Programs. Databases. Topographies of integrated circuits", 2012, no.2, pp. 500-501.
4. Parmar J. Total Losses in Power Distribution and Transmission Lines (Part 1). Gujarat, 2013. Mode of access: <http://electrical-engineering-portal.com/total-losses-in-power-distribution-and-transmission-lines-1>, free. Title from screen.
5. Parmar J. Total Losses in Power Distribution and Transmission Lines (Part 2). Gujarat, 2014. Mode of access: <http://electrical-engineering-portal.com/total-losses-in-power-distribution-and-transmission-lines-1>, free. Title from screen.