

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Известия ТСХА, выпуск 4, 1982 год.

УДК 63:621.311:519.21

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА РАБОТАЮЩИХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В. А. ВОРОБЬЕВ

(Кафедра электрификации с.-х. производства)

Электрические нагрузки определяют необходимые технические характеристики элементов электрических проводов и сетей — сечения и марки проводов, параметры коммутационной и защитной аппаратуры, мощности и типы силовых трансформаторов. Преувеличение ожидаемых нагрузок приводит к перерасходу проводов и кабелей и неоправданному омертвлению средств, вложенных в завышенную мощность трансформаторов, преуменьшение — к излишним потерям в сетях, перегреву проводов и трансформаторов и сокращению срока их службы. Следовательно, определение электрических нагрузок на всех ступенях электрических проводов и сетей сельскохозяйственных потребителей — одна из первых и основополагающих частей проектирования электроснабжения.

На необходимость совершенствования методов расчета электрических нагрузок сельскохозяйственных потребителей указывают следующие расчеты. В 1980 г. в сельском хозяйстве нашей страны общая мощность трансформаторных подстанций (ТП) с вторичным напряжением 0,4 кВ составляла 97,8 млн. кВт·А [10]. Если принять значение средневзвешенного коэффициента мощности сельскохозяйственных потребителей равным 0,8, то активная установленная мощность сельских ТП составляет $P = S \cdot \cos \varphi = 97,8 \cdot 0,8 = 78,24$ млн. кВт. При круглогодичной 100 %-ной нагрузке они пропустили бы количество электроэнергии $A_{\max} = 78,24 \cdot 365 \cdot 24 = 685,4$ млрд. кВт·ч.

В 1980 г. в сельском хозяйстве СССР потреблено 110 млрд. кВт·ч электроэнергии [12], т. е. нагрузка сельских ТП составила 16 % предельно возможного ее значения ($110 \cdot 100 : 685,4 = 16$ %). Однако, как известно [1], мощность силовых трансформаторов ТП подбирается по максимальной нагрузке работающих электроприемников (ЭП). Ввиду этого при оценке нагрузки ТП следует учитывать коэффициент заполнения графиков электрических нагрузок сельскохозяйственных потребителей $k_n = P_{\text{ср}} : P_{\max} = A : A_{\max}$. Согласно [1], средний коэффициент заполнения графика электрических нагрузок сельскохозяйственных потребителей ниже 0,5. Примем $k_n = 0,4$.

Тогда реальная пропускная способность сельских ТП будет равна $A = A_{\max} k_n = 685,4 \cdot 0,4 \cdot 274,16$ млрд. кВт·ч.

Таким образом, реальная нагрузка сельских ТП составляет $110 \cdot 100 : 274,16 = 40$ %, т. е. она в 2,5 раза меньше нормы.

Аналогичные данные приводятся в работе [9].

По прейскуранту [11] средняя стоимость установленного киловольт-ампера ТП равна 11 р. 51 к., а общая стоимость всех сельских ТП — 1125,68 млн. руб. Из них эффективно используется оборудование ТП всего лишь на 450,27 млн. руб.

Из приведенных расчетов видно, что увеличение нагрузки сельских ТП или уменьшение разрыва между расчетными и фактическими электрическими нагрузками сельскохозяйственных потребителей является актуальной народнохозяйственной задачей. Решение ее во многом определяется совершенствованием методов расчета электрических нагрузок. Об этом же свидетельствует анализ пропускной способности сельских линий электропередачи.

Многочисленные исследования показывают, что электрическая нагрузка сельскохозяйственного потребителя является случайной функцией времени. Это позволяет применять при анализе изменений электрических нагрузок, расчете и прогнозировании их понятия и методы теории вероятностей и теории случайных процессов.

Сельскохозяйственный потребитель электрической энергии имеет, как правило, несколько ЭП, каждый из которых в процессе работы при ряде включений создает поток включений. Ряд последовательных включений ЭП образует поток выключений. Несколько работающих ЭП создают на вводе потребителя суммарные потоки включений и выключений, которые, накладываясь друг на друга, образуют суммарный график электрических нагрузок [3] и определяют динамику изменения электрической нагрузки на вводе потребителя.

Исследования суммарных потоков включений и выключений ЭП на вводах разных сельскохозяйственных потребителей показали, что они ординарны, стационарны и не дают последствия [3]. Потоки, обладаю-

щие перечисленными свойствами, называются пуассоновскими [2], при этом вероятность включения (выключения) определенного числа ЭП w_x определяется формулой закона Пуассона

$$w_x = \frac{ax}{x!e^a}, \quad (1)$$

где x — число включаемых (выключаемых) ЭП; a — среднее число включаемых (выключаемых) ЭП.

Если из пуассоновского потока включений ЭП вычесть пуассоновский поток выключений, то получится результирующий поток включений ЭП, формирующий график электрической нагрузки сельскохозяйственного потребителя. Данный поток, как показали исследования [3, 4], также является пуассоновским. Это согласуется с теоремой, доказанной Райковым Д. А. [13], — «если сумма независимых случайных величин распределена по закону Пуассона, то каждая из величин должна быть пуассоновски распределена». Следовательно, график электрических нагрузок сельскохозяйственного предприятия, представленный суперпозицией потока включений и выключений ЭП, формируется результирующим пуассоновским потоком, т. е.

$$P(t) = \Pi_{\text{вкл}}^{\Sigma} - \Pi_{\text{выкл}}^{\Sigma} = \Pi_{\text{вкл}}^{\Sigma}, \quad (2)$$

$$\text{так как } \Pi_{\text{вкл}}^{\Sigma} = \Pi_{\text{вкл}}^{\Sigma} + \Pi_{\text{выкл}}^{\Sigma}.$$

Доказательства распределения электрических нагрузок сельскохозяйственных потребителей по закону Пуассона уже приведены в ряде работ [3, 4]. В данной статье ограничимся лишь изложением кратких результатов сопоставления теоретических и экспериментальных распределений электрических нагрузок по ТП № 1 откормочного комплекса совхоза «Растовцы» Московской области, что будет необходимо для дальнейших расчетов.

Ниже приводится суточная реализация электрического тока на вводе ТП № 1 за самые напряженные сутки, взятая из ансамбля реализаций, записанных регистрирующим амперметром. Она получена при спрямлении токовой регистрирующей в получасовых интервалах.

210	180	230	265	185	262	190	140
210	180	245	320	190	230	200	140
100	190	260	315	220	170	200	140
180	220	262	270	260	155	180	140
180	220	260	230	260	155	180	140
180	220	280	250	250	150	160	140

Т а б л и ц а 1

Эмпирическое ($m_{ik}/48$) и теоретическое (w_{ik}) распределения электрических нагрузок

Число ЭП	Электрическая нагрузка, А	m_i	m_{ik}	$m_{ik}/48$	w_i	w_{ik}
1	0—12	0	0	0	0	0
2	12—24	0	0	0	0,00001	0,00001
3	24—36	0	0	0	0,00003	0,00004
4	36—48	0	0	0	0,00014	0,00018
5	48—60	0	0	0	0,00049	0,00067
6	60—72	0	0	0	0,00139	0,00206
7	72—84	0	0	0	0,00337	0,00543
8	84—96	0	0	0	0,00717	0,0126
9	96—108	1	1	0,02083	0,01352	0,02612
10	108—120	0	0	0,02083	0,023	0,04912
11	120—132	0	0	0,02083	0,03555	0,08467
12	132—144	6	7	0,14583	0,05035	0,13502
13	144—156	3	10	0,2083	0,06585	0,20037
14	156—168	1	11	0,22917	0,07996	0,28083
15	168—180	4	15	0,3125	0,09062	0,37145
16	180—192	7	22	0,4583	0,09629	0,46774
17	192—204	3	25	0,5208	0,09628	0,56402
18	204—216	2	27	0,5625	0,09094	0,65496
19	216—228	4	31	0,6458	0,08136	0,73632
20	228—240	3	34	0,7083	0,06916	0,80548
21	240—252	3	37	0,77083	0,05599	0,86147
22	252—264	6	43	0,89583	0,043258	0,904728
23	264—276	2	45	0,9375	0,031976	0,936704
24	276—288	1	46	0,95833	0,02265	0,959354
25	288—300	0	46	0,95833	0,015401	0,974755
26	300—312	0	46	0,95833	0,010071	0,984826
27	312—324	2	48	1,0	0,0063405	0,9911665

П р и м е ч а н и е: m_i — частоты появления значения тока в определенном интервале; m_{ik} — накопленные (кумулятивные) частоты появления нагрузки, $m_{ik}/48$ — эмпирические кумулятивные вероятности появления нагрузки, w_{ik} — кумулятивные теоретические вероятности.

На основании данных о суммарной установленной мощности и общем числе ЭП, подключенных к ТП № 1, рассчитываем средний ток одного ЭП, который оказался равным 12,27 А. Представленную выше реализацию электрической нагрузки можно преобразовать в реализацию числа работающих ЭП. Для этого достаточно каждое значение тока разделить на средний ток одного ЭП и по полученным числам составить вариационный ряд (табл. 1).

Математическое ожидание указанной реализации равно 206,13 А. Следовательно, среднее число работающих ЭП на комплексе в течение данных суток: $a = 206,13 : 12,27 = 16,8$. Значит нам следует сравнить эмпирическое распределение электрической нагрузки упомянутой реализации с теоретическим распределением Пуассона, у которого a равно 17.

При расчетах вероятностей теоретического распределения используем таблицу приложения [3], где приведены значения вероятностей:

$$Q(m, a) = 1 - R(m, a) = 1 - \sum_{k=0}^m \frac{a^k}{k! e^a}$$

Так, значения w_i для второй строки получены следующим образом: $1 - 9,9999^{-1} = 1 - 0,99999 = 0,00001$; для третьей — $9,9999^{-1} - 9,9996^{-1} = 0,99999 - 0,99996 = 0,00003$ и т. д.

Степень соответствия эмпирического и теоретического распределений можно оценить с помощью критерия Колмогорова [2]. Наибольшее их расхождение наблюдается в 20-м разряде, когда $D = 0,80548 - 0,7083 = 0,09718$. Критерий Колмогорова равен

$$\lambda = 0,09718 \sqrt{48} = 0,6733. \quad (3)$$

По табл. 7.61 [2] видно, что при значении $\lambda = 0,6733$ вероятность находится между значениями 0,6 и 0,7. Это указывает на хорошее соответствие эмпирических и теоретических данных, а также на достаточно высокую достоверность вывода о пуассоновском распределении числа работающих ЭП.

Более точные данные о степени достоверности выдвинутой гипотезы дает критерий К. Пирсона [2]. Основные расчеты по вычислению этого критерия представлены в табл. 2.

Ввиду того, что в некоторых разрядах табл. 1 числа появлений нагрузки меньше пяти, в соответствии с рекомендацией Вентцель [2] они объединены с соседними. Число степеней свободы $r = 7 - 2 = 5$. По табл. 4 приложения [2], используя интерполяцию, определяем вероятность $w = 0,94$. Это достаточно большое значение, чтобы считать наше предположение относительно распределения числа работающих ЭП по формуле (4), не противоречащим экспериментальным данным. Если взять несколько суточных реализаций электрического тока, то за счет случайных сдвигов моментов включений ЭП суммарный график электрических нагрузок и результирующая гистограмма сглаживаются и степень достоверности распределения электрических нагрузок по закону Пуассона возрастает.

Одним из наиболее характерных признаков распределенности случайной величины по закону Пуассона является равенство математического ожидания и дисперсии. Графики электрических нагрузок сельскохозяйственных предприятий не всегда выдерживают такую проверку. Это объясняется тем, что каждый ЭП имеет номинальную мощность, измеряемую несколькими ваттами, и ток, измеряемый несколькими амперами. При включении каждого такого ЭП электрическая нагрузка сразу изменяется скачком на несколько ватт (киловатт) или ампер. Поэтому дисперсия, связанная с квадратом электрической нагрузки, во многих случаях оказывается больше математического ожидания.

Исследования показывают, что вариационные ряды числа работающих ЭП более полно соответствуют характеристикам закона Пуассона. Для вариационных рядов числа работающих ЭП характерно равенство математического ожидания и дисперсии.

В этом можно убедиться, используя данные нашего примера. Для представленной реализации электрического тока и вариационного ряда числа работающих ЭП (табл.

Т а б л и ц а 2

К расчету критерия Пирсона

Электрическая нагрузка, А	m_i	m_{ih}	w_i	nw_i	$ m_{ih} - nw_i $	$(m_{ih} - nw_i)^2$	$\frac{(m_{ih} - nw_i)^2}{nw_i}$
0—144	7	7	0,13502	6,48	0,52	0,2704	0,04173
144—180	8	15	0,37145	17,83	2,83	8,0089	0,04492
180—204	10	25	0,56402	27,07	2,07	4,2849	0,15298
204—228	6	31	0,73632	35,34	4,34	18,8356	0,53762
228—252	6	37	0,86147	41,35	4,35	18,9225	0,45762
252—264	6	43	0,904728	43,43	0,43	0,1849	0,00426
264—324	5	48	0,9911665	47,58	0,42	0,1764	0,00371
							$\chi^2 = 1,24351$

П р и м е ч а н и е. Обозначения столбцов те же, что в табл. 1.

1, m_i) значение дисперсии числа работающих ЭП равно

$$D_k = \frac{n}{n-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^n k^2}{n} - a^2 \right) =$$

$$= \frac{n}{n-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{I_i}{I_0} \right)^2}{n} - a^2 \right] =$$

$$= \frac{48}{47} \left(\frac{2158338}{12,27^2 \cdot 48} - 16,8^2 \right) = 16,8.$$

Таким образом, в данном случае выполняется равенство математического ожидания и дисперсии.

Чтобы экспериментально полученную реализацию электрической нагрузки преобразовать в вариационный ряд числа работающих ЭП, распределенный по закону Пуассона, нужно определить среднюю мощность (ток) одного ЭП и затем зарегистрированные значения электрической нагрузки разделить на средний ток одного ЭП. В тех случаях, когда определить ток (нагрузку) одного ЭП по установленной мощности и общему числу ЭП нельзя, этот показатель рассчитывается по формуле

$$I_0 = \frac{n}{n-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2}{mM_I} - M_I \right). \quad (4)$$

Зависимость получена на основании равенства дисперсии и математического ожидания для пуассоновского процесса, т. е.

$$D_k(I_0) = a. \quad (5)$$

Дисперсию числа работающих ЭП, как известно [2], можно определить по формуле

$$D_k = \frac{n}{n-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^n k^2}{n} - a^2 \right). \quad (6)$$

В нашем случае значения силы тока I_i связаны с числом работающих ЭП k и средним значением тока одного ЭП I_0 следующей зависимостью

$$I_i = kI_0, \text{ откуда } k = I_i/I_0. \quad (7)$$

Подставив значение k в выражение (8) и приравняв его математическому ожиданию, получим уравнение

$$\frac{n}{n-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{I_i}{I_0} \right)^2}{n} - \frac{M_I^2}{I_0^2} \right] = \frac{M_I}{I_0}. \quad (8)$$

Сократив знаменатель на I_0 и выполнив несложные преобразования, будем иметь

$$\frac{1}{I_0} \left(\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2}{n} - M_I^2 \right) \frac{n}{n-1} = M_I, \quad (9)$$

откуда вытекает зависимость (4).

Используя (9), можно определить значение среднего тока одного ЭП для любой реализации электрической нагрузки и эта реализация может быть преобразована во временной, а затем и в вариационный ряд числа работающих ЭП, который управляется законом Пуассона.

Чтобы проанализировать, как изменяются вероятностные характеристики электрических нагрузок (математическое ожидание и дисперсия) чисел работающих ЭП в зависимости от среднего значения тока электроприемника I_0 , нами взята возрастающая часть рассмотренной выше реализации электрической нагрузки. Результаты обработки реализации представлены в табл. 3. С увеличением значения среднего тока одного ЭП значения математического ожидания и дисперсии чисел работающих ЭП уменьшаются. При этом темп снижения математического ожидания меньше, чем дисперсии. Из табл. 3 видно, что при изменении значения среднего тока ЭП от 1 до 20 А математическое ожидание уменьшилось примерно в 20 раз, а дисперсия — в 540 раз. Равенство a и D_k достигается вблизи значения $I_0 \cong 8$ А.

На основании изложенного можно наметить следующую схему расчета электрических нагрузок сельскохозяйственных потребителей.

Первоначально необходимо определить среднюю мощность (ток) одного работающего ЭП. Для этого нужно составить «ординарный» список имеющихся у потребителя ЭП, куда под разными номерами записывают ЭП, включающиеся в работу в различные моменты времени, и под одним номером — включаемые одновременно. К числу последних следует отнести электрические калориферы, у которых одновременно включаются нагревательные элементы и вентиляторы; холодильные установки, поскольку у них включаются компрессоры и вентиляторы; вакуумнасосы, включающиеся на время доения коров; навозные конвейеры, у которых одновременно работают наклонная и горизонтальная части; осветительные и облучательные установки и др.

Используя полученное число одновременно включаемых ЭП, определяем среднюю мощность одного ЭП по формуле

$$P_{ср} = P_{уст} / n_0, \quad (10)$$

где $P_{уст}$ — установленная мощность всех ЭП, кВт; n_0 — ординарное число ЭП.

На основании норм, характеризующих потребление электроэнергии на 1 гол. скота (птицы) или единицу продукции аналогичных потребителей, определяем количество электроэнергии, потребляемой данным предприятием за год по формулам:

$$A_{г} = A_{уд}^N N; \quad A_{г} = A_{уд}^V V; \quad A_{г} = A_{уд}^F F, \quad (11)$$

где $A_{уд}^N$, $A_{уд}^V$, $A_{уд}^F$ — нормы потребления электроэнергии аналогичными потребителями соответственно на 1 гол., единицу объема продукции, единицу площади, кВт·ч; N , V , F — соответственно поголовье, объем производимой продукции, площадь проектируемого объекта (потребителя).

Расчет математического ожидания и дисперсии чисел работающих ЭП (k)

№	$I_{Э, А}$						
	1	2	5	8	10	15	20
1	180	90	36	23	18	12	9
2	190	95	38	24	19	13	10
3	220	110	44	28	22	15	11
4	230	115	46	29	23	—	—
5	245	123	49	31	25	16	12
6	260	130	52	33	26	17	13
7	262	131	—	—	—	—	—
8	280	140	56	35	28	19	14
9	320	160	64	40	32	21	16
Результаты промежуточных вычислений							
Σ	2187	1094	385	243	193	113	85
a	243	121,56	48,13	30,38	24,13	16,14	12,14
$\frac{\Sigma k^2}{n}$	61874,33	15204,44	2391,13	950,63	600,88	269,29	152,43
$\frac{\Sigma k^2}{n} - a^2$	2825,33	427,61	74,63	27,69	18,62	8,8	5,05
D_k	3178,49	481,06	85,29	31,65	21,28	10,26	5,89

В связи с тем, что необходимо определить получасовой максимум электрической нагрузки, определяем среднюю мощность, потребляемую предприятием (потребителем) в течение 30 мин по формуле

$$P_{ср. 0,5} = \frac{A_{\Gamma}}{365 \cdot 24 \cdot 2} = \frac{A_{\Gamma}}{17520}. \quad (12)$$

Используя значение средней мощности одного ЭП, определяем среднее число работающих ЭП по формуле

$$Q = \frac{P_{ср. 0,5}}{P_{ср}}. \quad (13)$$

По зависимости, полученной в результате преобразования формулы (4)

$$k = 2,49a^{0,8226} + 2,23, \quad (14)$$

рассчитываем число ЭП, участвующих в максимуме. Затем определяем максимальную (расчетную) мощность, умножая число ЭП, участвующих в максимуме, на среднюю мощность одного ЭП:

$$P_{расч} = kP_{ср}. \quad (15)$$

Подставив все промежуточные формулы в выражение (14), получим окончательную зависимость

$$P_{расч} = \frac{P_{уст}}{n_0} \times \left[2,49 \left(\frac{A_{\Gamma} n_0}{17520 P_{уст}} \right)^{0,8226} + 2,23 \right], \quad (16)$$

по которой можно вести расчеты максимальных нагрузок сельскохозяйственных потребителей.

Пример расчета электрических нагрузок.

Данный пример выполнен для условий животноводческого комплекса по откорму

крупного рогатого скота на 10 000 гол. совхоза «Растовцы» Московской области.

I. Составляем «ординарный» список ЭП комплекса (табл. 4), из которого следует, что комплекс имеет 295 таких ЭП.

II. Рассчитываем по формуле (10) среднюю мощность одного ЭП

$$P_{ср} = 1511,7 : 295 = 5,12 \text{ кВт.}$$

III. Вычисляем годовое потребление электроэнергии всем комплексом на основании данных о размерах самого комплекса (10 тыс. гол.) и потребности энергии на 1 гол. скота (согласно [8] на 1 гол. скота на комплексах по откорму животных необходимо затратить 240 кВт·ч в год): $A_{\Gamma} = 240 \cdot 10\,000 = 2\,400\,000$ кВт·ч.

IV. Определяем получасовую мощность комплекса:

$$A_{0,5ч} = \frac{A_{\Gamma}}{365 \cdot 24 \cdot 2} = \frac{2\,400\,000}{17520} = 136,99 \text{ кВт.}$$

V. Используя полученные значения $A_{0,5ч}$ и средней мощности одного ЭП, определяем среднее число работающих ЭП:

$$a = \frac{A_{0,5ч}}{P_{ср}} = \frac{136,99}{5,12} = 26,76.$$

VI. Подставив среднее число работающих ЭП в выражение (17), имеем число ЭП в максимуме $k = 2,49 \cdot 26,76^{0,8226} + 2,23$, откуда $k = 39,43$.

VII. Умножаем число ЭП в максимуме на среднюю мощность одного электроприемника и получаем расчетную (максимальную) электрическую нагрузку $P_{расч} = kP_{ср} = 39,43 \cdot 5,12 = 201,88$ кВт.

Зарегистрированная самопишущим амперметром максимальная нагрузка на вводе данного комплекса составила 375 А или

$$P_{max} = \sqrt{3}UI \cos \varphi = 1,73 \cdot 380 \cdot 375 \cdot 0,8 =$$

Т а б л и ц а 4

«Ординарный» список
электроприемников комплекса

№	Электроприемники	Количе- ство	Единичная мощность, кВт	Общая мощность, кВт
1	Кормораздаточ- ный конвейер	20	2×6,5	260
2	Двухходовой рас- пределитель	20	0,6	12
3	Кормораздаточ- ный конвейер	10	1,1	11
4	Установка приг. молока	20	0,75	15
5	Насос заместеле- ля молока	10	0,6	6
6	Калорифер	40	5,5	220
7	»	1	2,2	2,2
8	»	20	4	80
9	»	1	3	3
10	Крышной венти- лятор	40	9×0,18	64,8
11	»	30	0,75	22,5
12	Вытяжной »	20	3	60
13	Вентилятор	4	0,6	2,4
14	Компрессор	2	100	200
15	Приточный венти- лятор	20	4	80
16	ИКУФ-1	10	21	210
17	Холодильник	2	3	6
18	Тельфер, элект- родвигатель № 1	1	3	3
19	Тельфер, элект- родвигатель № 2	1	1	1
20	Насос	2	30	60
21	Пресс	2	7,5	15
22	Грохот	2	5,5	11
23	Навозный кон- вейер	2	4	8
24	Нория	1	2,2	2,2
25	Шнековый кон- вейер	5	2,2	11
26	Тросошайбовый конвейер	1	5	5
27	Погружной насос	1	12	12
28	Пожарный насос	2	5,5	11
29	Хозяйственный насос	3	7	21
30	Дренажный на- сос	1	4	4
31	Электрическое ос- вещение	1	92,6	92,6
	Всего	295	—	1511,7

$= 197,22$ кВт.

Абсолютная ошибка $\Delta = 201,88 - 197,22 = 4,66$ кВт; относительная ошибка

$$\Delta \% = \frac{4,66}{197,22} 100 = 2,33 \%$$

Если пользоваться для определения расчетной мощности данного комплекса методикой [8], то она регламентирует для комплексов по откорму 10 тыс. гол. крупного

рогатого скота расчетную мощность 600 кВА, или при $\cos\varphi = 0,8$ $P_{расч} = 480$ кВт. В данном случае абсолютная ошибка в предсказании значения расчетной мощности составляет $\Delta = 480 - 197,22 = 282,78$ кВт, а относительная —

$$\Delta \% = \frac{282,78}{197,22} 100 = 143,4 \%$$

Таким образом, предлагаемая методика определения максимальных (расчетных) электрических нагрузок дает более точные результаты, чем существующие методы.

Для проверки полученных результатов или в качестве самостоятельного расчета электрических нагрузок можно использовать зависимость (1), в которой среднее число работающих ЭП определяется на основании сведений о режимах работы ЭП предприятия. В данном случае

$$a = \lambda t_{ср},$$

где λ — количество включений ЭП в единицу времени; $t_{ср}$ — среднее время работы одного ЭП.

Другим путем уточнения расчетов электрических нагрузок является учет распределения установленных мощностей ЭП. Необходимость этого обуславливается большим различием мощностей ЭП на современных сельскохозяйственных предприятиях. При этом за элементарный принимается ЭП самой малой мощности. Общее число установленных и среднее число работающих ЭП определяется в результате деления суммарной установленной мощности и средней мощности, потребляемой предприятием за полчаса, на указанную минимальную мощность элементарного ЭП, т. е. $n = P_{уст} / P_{min}$, $a_1 = P_{ср.0,5} / P_{min}$.

Но в данном случае следует принимать во внимание то, что элементарные ЭП включаются группами, если имеются ЭП, мощности которых в несколько раз больше, чем у элементарных.

На сельскохозяйственном предприятии в «вызывающие моменты» (по Г. П. Климову [7]), образующие пуассоновский поток с параметром a_1 , включаются различные по мощности ЭП. В каждый такой момент включается k_0 элементарных ЭП с вероятностью ω_0 . Математическое ожидание данного пуассоновского потока [7] определяется выражением $a = a_1 \omega_0$.

Вероятность включения k элементарных ЭП зависит от распределения установленных мощностей ЭП предприятия. На основании этого распределения на первом этапе можно определить среднюю вероятность включения k_0 , разделив единицу на общее число значений мощностей ЭП.

Проиллюстрируем реализацию этого метода на данных нашего примера. Из табл. 4 видно, что минимальная мощность ЭП 0,6 кВт. Определенная в пункте IV средняя получасовая мощность комплекса 136,99 кВт. Отсюда среднее число работающих элементарных ЭП $a_1 = 136,99 / 0,6 = 228,32$. Средняя вероятность включения элементарных ЭП, вычисленная по данным табл. 5, $\omega_0 = 0,1$. Значит среднее число ра-

Т а б л и ц а 5

Распределение установленных мощностей ЭП комплексов

№	Мощности ЭП	Количество ЭП	Обобщенное количество ЭП	Число ступеней мощности
1	0,6	34	134	1
2	0,75	50		
3	1,1	10		
4	1,62	40		
5	2,2	7	31	2
6	3	24		
7	4	43	43	3
8	5	1	45	4
9	5,5	44		
10	7	3		
11	7,5	2	5	5
12	12	1		
13	13	20	20	6
14	92,6	1	1	7
15	100	2	2	9
	Всего	284	284	10

ботающих обычных ЭП будет равно $a = a_1 \omega_0 = 228,32 \cdot 0,1 = 22,83$.

Далее определяем среднюю мощность одного обычного ЭП:

$$P_{\text{ср}} = \frac{136,99}{22,83} = 6 \text{ кВт.}$$

По зависимости (13) рассчитываем число ЭП в максимуме:

$$k = 2,49 \cdot 22,83^{0,8226} + 2,23 = 34,87.$$

Расчетная электрическая нагрузка получается равной

$$P_{\text{расч}} = k P_{\text{ср}} = 34,87 \cdot 6 = 209,22 \text{ кВт.}$$

Это значение получилось несколько больше значения расчетной нагрузки, вычисленной в примере. Однако и здесь точность достаточно высока — относительная ошибка 6,1%. Меньшая точность объясняется тем, что допущено равенство вероятностей включения различных ЭП.

В качестве проверочного или самостоятельного расчета электрических нагрузок может использоваться зависимость

$$k = a + 2,5 \sigma,$$

где σ — среднее квадратическое отклонение; 2,5 — коэффициент, соответствующий вероятности появления максимальной нагрузки, равной 0,005.

Для пуассоновского распределения числа работающих ЭП, как было показано выше, справедливо равенство

$$a = D = \sigma^2.$$

В связи с этим, зная значение a , можно определить среднее квадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{a}$$

и использовать его для проверки расчетов или для расчета электрических нагрузок предприятия.

Иллюстрируем эту возможность также на базе данных приведенного выше примера, где $a = 26,76$:

$$\sigma = \sqrt{a} = \sqrt{26,76} = 5,17.$$

Число ЭП в максимуме $k = 2,5 \sigma + a = 26,76 + 2,5 \cdot 5,17 = 26,76 + 12,93 = 39,69$.

Отсюда расчетная электрическая нагрузка равна

$$P_{\text{расч}} = 39,69 \cdot 5,12 = 203,21 \text{ кВт, } \Delta \% = 3 \%.$$

Выводы

1. Анализ данных о загрузке сельских трансформаторных подстанций свидетельствует о необходимости уточнения методов расчета электрических нагрузок сельскохозяйственных потребителей.

2. Формирование электрических нагрузок на сельскохозяйственных предприятиях подчиняется закону Пуассона, вследствие этого число работающих электроприемников распределяется по этому закону.

3. Изменяющиеся реализации электрической нагрузки могут быть преобразованы во временные ряды и вариационные ряды чисел работающих электроприемников, распределенные по закону Пуассона.

4. На основе использования закона Пуассона возможна разработка нескольких методов расчета электрических нагрузок, обладающих более высокой точностью, чем существующие методы. В данной статье приведены модельные расчеты по конкретному предприятию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будзко И. А., Гессен В. Ю., Левин М. С. Электроснабжение с.-х. предприятий и населенных пунктов. М.: Колос, 1975. — 2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. — 3. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей. М.: Наука, 1973. — 4. Воробьев В. А. Исследование взаимосвязей параметров электрических нагрузок сельскохозяйственных потребителей. — Изв. ТСХА, 1972, вып. 5, с. 179.—187. — 5. Воробьев В. А. Исследование распределений электрических нагрузок сельскохозяйственных предприятий. — Изв.

ТСХА, 1974, вып. 4, с. 188—195. — 6. Воробьев В. А. К расчету электрических нагрузок сельскохозяйственных предприятий. — Изв. ТСХА, 1980, вып. 1, с. 164—168. — 7. Климов Г. П. Стохастические системы обслуживания. М.: Наука, 1966. — 8. Методические рекомендации по определению технико-экономических показателей использования топлива и энергии в животноводстве. М., ВИЭСХ, 1980, с. 20—23. — 9. Волосатов О. П., Молосцов Н. Ф. Электроснабжение комплексов по производству продукции животноводства на индустриальной основе. — В кн.: Повышение каче-

ства электроснабжения сельск. хоз-ва. Т. 45. М., ВИЭСХ, 1978, с. 39.—10. Информационный сборник. М.: Сельэнергопроект, 1981, с. 11.—11. Прейскурант на строительство объектов электроснабжения сельск. хоз-ва. М.: Сельэнергопроект, 1977. — 12. Прищеп Л. Г., Учеб-

ник сельского электрика. М.: Колос, 1981, с. 4 — 13. Райков Д. А. О положительно-определенных функциях. — Докл. АН СССР, 1940, т. XXVI, с. 857—862.

Статья поступила 1 декабря 1981 г.

SUMMARY

It was shown that statistical distribution of the number of working electric receivers of an agricultural enterprise could be regulated according to Poisson law. On this basis it was suggested the method of calculation of electric power consumption which allowed to obtain more accurate results than it could be done with existing methods.