

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Известия ТСХА, выпуск 5, 1987 год

УДК 63:621.311:519.21

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В. А. ВОРОБЬЕВ

(Кафедра электрификации сельскохозяйственного производства)

В статье приводятся данные, подтверждающие простейший характер потока включений электроприемников на вводах сельскохозяйственных предприятий, а также разнообразный характер распределений продолжительности работы электроприемников на различных сельскохозяйственных предприятиях. Установлена новая оригинальная зависимость вероятности электрической нагрузки от числа работающих электроприемников и их мощности.

Расчетные значения электрических нагрузок (ЭН) в различных точках системы электроснабжения сельскохозяйственного производства определяют основные технические решения, связанные со значительными капитальными затратами и издержками при создании и эксплуатации электрического хозяйства любого электрифицированного объекта. Ожидаемые ЭН определяют эффективность электроснабжения предприятий любой отрасли народного хозяйства на всех уровнях от отдельного электроприемника (ЭП) до границы раздела предприятия с энергосистемой.

До настоящего времени ЭН рассчитывались на основе средних нагрузок по принципу, предложенному [19]. Практика длительного использования данного метода показала его несовершенство. Это обусловлено рядом причин. К их числу относится прежде всего то, что упорядоченные диаграммы являются тяжелейшими моделями по тепловому воздействию на элементы электроснабжения. Вероятность реализации таких моделей в практических условиях ничтожно мала. Кроме того, предполагается, что в течение одной наиболее нагруженной смены все ЭП будут максимально загружены. Вероятность этого на практике близка к нулю.

Одним из основных параметров, используемых в методе упорядоченных диаграмм, является эффективное число ЭП. Формула, по которой определяется это число, справедлива только для однородных ЭП, что на практике встречается весьма редко. Ввиду этого погрешность при определении эффективного числа ЭП существенно возрастает.

В указанном методе необходимо разделение ЭП на имеющие переменный и постоянный графики нагрузки, что осуществляется очень субъективно и, естественно, отрицательно влияет на точность расчетов. Метод базируется на коэффициенте загрузки электрооборудования, равном 0,8, в то время как на реальных объектах этот коэффициент изменяется в значительных пределах. В его основу положен общий вероятностный закон — нормальный, который принят без достаточно глубоких физических обоснований. Имеются и другие недостатки, которые в совокупности с изложенными привели к тому, что разрыв между расчетными и фактическими ЭН промышленных предприятий еще в 1978 г. оценивали 200 % [9]. В сельской энергетике, где преобладают эмпирические методы определения ЭН, положение еще сложнее.

Ошибка в расчетах ЭН имеет две составляющие. Первая — разница в нагрузке при достижении заданных проектом технологических показателей. Это меньшая часть ошибки, но и она велика, так как в опреде-

ленных случаях достигает нескольких сотен процентов по отношению к фактической максимальной нагрузке. Снижение этой части ошибки до 5—10 % является главной задачей расчета ЭН. Вторая — большая часть ошибки приходится на определение значения нагрузки, не связанное со временем.

Существующие методы определения ЭН не дифференцированы для различных уровней системы электроснабжения и разных стадий выполнения проекта и согласования схемы электроснабжения с энергосистемой. Они не учитывают сложившейся в стране системы учета и отчетности по электропотреблению, порядка определения заявляемой электрической мощности предприятия в часы максимума нагрузки энергосистемы, системы лимитирования и требований по регулированию режимов электропотребления [9].

Повышение точности расчетов ЭН тесно связано с большой экономией энергии, материалов и трудовых затрат, так как нагрузки определяют технические характеристики элементов электроснабжения — сечения и марки проводов, мощности и типы трансформаторов, параметры коммутационной аппаратуры и релейной защиты. Согласно [9], повышение загрузки сократит ежегодные потери электроэнергии в трансформаторах на 9 ТВт·ч, обеспечит ежегодную экономию алюминия не менее 14 тыс. т, меди — 3 тыс. т при монтаже систем электропередач. Появляется возможность отказаться от сооружения части трансформаторных подстанций и сетей, обеспечить техническое перевооружение с меньшими затратами.

Для системы Госагропрома, где ежегодно вводится в среднем 6 млн. кВА трансформаторов, которые оказываются загруженными на 30—35 %, что соответствует 2 млн. кВА эффективно используемым трансформаторам при 100 % загрузке. Если считать, что 50 % вводимых трансформаторов используется для повышения надежности электроснабжения, то ежегодно можно не устанавливать 2 млн. кВА трансформаторов. При цене за 1 кВА 22 руб. это обеспечит годовой экономический эффект 44 млн. руб., а за пятилетие 220 млн. руб. Подсчитать экономический эффект за счет уменьшения сечения проводов сельских линий электропередачи, общая длина которых превышает 4 млн. км, сложнее. Здесь имеются большие резервы, так как эти сечения определены по недостаточному обоснованным методикам и выбраны с большим запасом.

В методических указаниях по расчету ЭН Сельэнергопроекта [11] приводятся подробные графики ЭН по 368 объектам, но это является примером введения «сущности без необходимости», что не рекомендуется в науке (принцип «бритва Оккама»), Применяющиеся при расчетах ЭН определения требуют уточнений, новые проблемы и явления, отражающие количественные и качественные изменения в системе электроснабжения, требуют новой терминологии.

Научно-технический прогресс в системе электроснабжения агропромышленного комплекса обусловил новый порядок планирования и проектирования, связанный с совершенствованием хозяйственного механизма, перестройкой инвестиционной и структурной политики; курс на экономию топливно-энергетических ресурсов в связи с необходимостью решения Энергетической программы СССР; усложнение электрического хозяйства и увеличение его масштабов.

Новый порядок планирования и проектирования заключается в переходе к принятию технических решений, определению стоимостей элементов электроснабжения, штатов на год, 5, 10 лет и более.

Современные сельскохозяйственные предприятия имеют большое количество разнотипных ЭП, технологически связанных между собой. В связи с этим невозможно отличить современное сельскохозяйственное предприятие от промышленного. Если в промышленной энергетике уже давно исследованы основные характеристики множества элементов системы электроснабжения предприятия, которые образуют систему нового типа — техноценоз [8], то в сельскохозяйственном производстве подобные исследования только начинаются. Так, некоторые авторы [10]

Статистические параметры распределений установленных мощностей электроприемников сельскохозяйственных предприятий

Объект	P_n	n	n_s	Md	D	σ	P_c
1. ТП № 102, птицеферма «Марийская»	2110,3	930	51,7	0,08	87,64	9,36	2,27
2. ТП № 101, птицеферма «Марийская»	1767,88	1310	411,8	1,1	3,98	1,99	1,35
3. ТП № 2, Тр № 1, птицеферма «Петелинская»	1281,36	266	133,17	1,1	23,23	4,82	4,82
4. ТП № 2, Тр № 2, птицеферма «Петелинская»	1395,24	129	16,24	1,1	818,73	28,61	10,82
5. ТП № 1, откормочный комплекс совхоза «Ра-стовцы»	878,8	136	33,45	5,5	128,94	11,35	6,46
6. ТП № 2, откормочный комплекс совхоза «Ра-стовцы»	635,9	168	54,63	0,75	29,91	5,47	3,79
7. ТП № 1, откормочный комплекс совхоза «Дружба»	1339,9	869	194,44	1,1	8,26	2,87	1,54
8. ТП № 1, молочный комплекс совхоза «По-беда»	688,5	100	9,34	0,1	464,88	21,56	6,89
9. ТП № 2, молочный комплекс совхоза «По-беда»	713,2	78	14,88	2,2	359,33	18,95	9,14
10. ТП № 68, свиноводче-ский комплекс совхо-за Им. 50 лет СССР	1436,06	305	87,38	0,37 1,55 3,00	55,39	7,44	4,71

Примечание. P_n — установленная мощность ЭП; n — число ЭП; n_s — число эффективных ЭП [19]; Md — мода распределения мощностей ЭП; D и σ — дисперсия и среднее квадратическое отклонение распределений; P_c — средняя мощность одного ЭП.

считают современное животноводческое предприятие сложной многоуровневой динамической или биотехнической системой. С учетом опыта, накопленного в промышленной энергетике, современные крупные электрифицированные сельскохозяйственные предприятия вполне обоснованно можно отнести к биотехноценозам.

В табл. 1 приведены основные статистические параметры распределений установленных мощностей ЭП ряда обследованных сельскохозяйственных предприятий. Из данных табл. 1 видно, что наибольшее число ЭП, т. е. мода (Md) распределений мощностей, имеет сравнительно небольшую мощность. Встречаются двух- (объект 5) и трехмодальные распределения (объект 10). Полученные характеристики сельскохозяйственных предприятий согласуются с Н-распределениями, анализируемыми в промышленной энергетике [8].

При переходе от распределений мощностей ЭП к ЭН необходимо учитывать характер работы ЭП, который определяется технологией выполняемых работ. Анализ графиков ЭН на вводах сельскохозяйственных предприятий показывает, что они формируются путем наложения потоков включений и выключений ЭП. Ниже приводятся результаты исследований потока включений ЭП на вводе трансформаторной подстанции № 1 комплекса по откорму крупного рогатого скота совхоза «Растровцы» Московской обл. На рис. 1 показан отрезок реализации силы тока на вводе этого объекта, полученной регистрирующим амперметром. На основании этой реализации составлена табл. 2, в которой даны характеристики длительности интервалов времени между включениями ЭП и их квадраты.

По данным табл. 2 определяются математическое ожидание m_i и дисперсия интервалов времени между включениями ЭП D_1 , на основа-

Характеристики длительности интервалов времени между включениями электроприемников

Δt	Δt^2	Δt	Δt^2	Δt	Δt^2	Δt	Δt^2	Δt	Δt^2	Δt	Δt^2	Δt	Δt^2	Δt	Δt^2
14	196	3	9	2	4	2	4	2	4	4	16	7	49		
2	4	1	1	1	1	1	1	1	1	4	16	1	1		
3	9	1	1	3	9	1	1	1	1	2	4	12	144		
2	4	1	1	2	4	1	1	3	9	2	4	1	1		
3	9	2	4	2	4	1	1	1	1	10	100	3	9		
2	4	1	1	5	25	1	1	1	1	2	4	2	4		
10	100	7	49	2	4	3	9	16	256	5	25	4	16		
6	36	1	1	2	4	1	1	3	9	2	4	4	16		
5	25	3	9	3	9	2	4	12	144	1	1	7	49		
1	1	1	1	1	1	1	1	5	25	1	1	4	16		
7	49	3	9	3	9	2	4	36	1296	3	9	3	9		
1	1	4	16	2	4	3	9	28	784	1	1	5	25		
8	64	3	9	1	1	1	1	18	324	3	9	1	1		
13	169	1	1	1	1	1	1	9	81	3	9	7	49		
5	25	1	1	1	1	4	16	6	36	1	1	2	4		
6	36	3	9	1	1	2	4	2	4	6	36	6	36		
8	64	2	4	2	4	2	4	1	1	2	4	7	49		
1	1	1	1	1	1	1	1	3	9	1	1	1	1		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	4	3	9		
1	1	2	4	2	4	3	9	1	1	7	49	2	4		
1	1	1	1	2	4	3	9	8	64	1	1	2	4		
1	1	1	1	1	1	2	4	3	9	10	100				
2	4	2	4	1	1	1	1	4	16	1	1	$\sum_{i=1}^{171} \Delta t = 589$			
4	16	1	1	1	1	1	1	11	121	1	1	$\sum_{i=1}^{171} \Delta t^2 = 5305$			

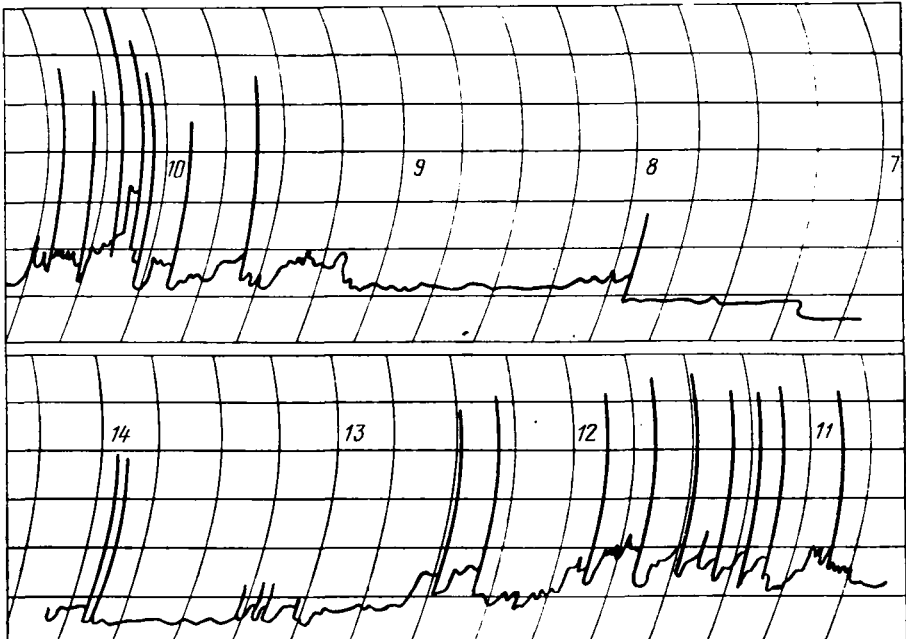


Рис. 1. Отрезок реализации силы тока на вводе трансформаторной подстанции Ms 1 комплекса по откорму крупного рогатого скота совхоза «Растовцы» Московской области.

К расчету критерия Пирсона

m_{ik}	nw_r	$ m_{ik} - nw_r $	$(m_{ik} - nw_r)^2$	$\frac{(m_{ik} - nw_r)^2}{nw_r}$
140	130,93	9,07	82,26	0,6283
161	161,70	0,70	0,49	0,0030
167	168,82	1,80	3,24	0,0192
169	170,49	1,49	2,22	0,0130
169	170,88	1,88	3,534	0,0207
170	170,97	0,97	0,9409	0,0055
170	170,99	0,99	0,9801	0,0057
171	170,99	0,01	0,0001	0,000058
				$\chi^2=0,6954$

нии которых определен коэффициент последствия в рассматриваемом потоке (номер нормированного потока Эрланга) [2]:

$$k_n = m_i^2 / D_i - 1 = -0,3872. \quad (1)$$

Таким образом, в рассматриваемом потоке включений ЭП последствие близко к нулю. Это указывает на простейший характер потока включений ЭП. Кроме того, необходимо отметить установленный автором новый факт существования класса потоков Эрланга отрицательного порядка, имеющих отрицательное последствие.

Отрицательное последствие в потоке включений ЭП данного предприятия можно рассматривать как резерв для добавления к существующему потоку включений нескольких регулярных потоков включений ЭП. При таком суммировании последствие в результирующем потоке включений ЭП сначала станет равным нулю, а потом — больше нуля.

Для получения разносторонних оценок характера потока включений ЭП необходимо исследовать распределение промежутков времени между отдельными включениями ЭП указанного предприятия. По данным табл. 2 составлен вариационный ряд длительности интервалов времени

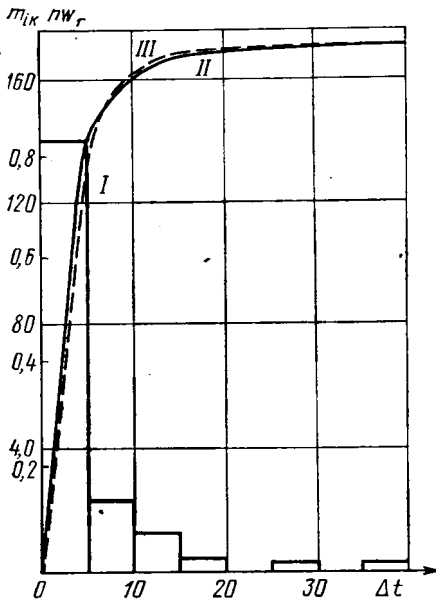


Рис. 2. Гистограмма (I), статистическая (II) и теоретическая (III) кривые распределений длительности интервалов времени между включениями электроприемников.

между включениями ЭП m_{ih} , который представлен в табл. 3. Характер изменения частот появления интервалов времени в разрядах дает основание предположить экспоненциальное распределение их согласно зависимости

$$F(t_p) = 1 - e^{-0,291 \Delta t} = n w_r. \quad (2)$$

Статистическая и теоретическая кривые распределения длительности интервалов времени между включениями ЭП представлены на рис. 2, из которого видно близкое расположение указанных кривых. Для более объективной количественной оценки степени соответствия теоретического и статистического распределений использован критерий Пирсона [15], основные стадии расчета которого представлены в табл. 3. Число степеней свободы $f = 8 - 2 = 6$.

В табл. IV приложения [15] при $f=6$ и $\chi^2=0,872$ указана вероятность 0,99. У нас же $\chi^2=0,695$,

Сопоставление статистической m_{ik} и теоретической pw_{ik} функций распределения силы тока на вводе трансформаторной подстанции № 1 комплекса по откорму крупного рогатого скота совхоза «Дружба» Вологодской обл.

Интервал тока, А	m_i	m_{ik}	w_i	w_{ik}	pw_{ik}
1	2	3	4	5	6
0—230	0	0	0,000	0,000	0
230—235	1	1	0,000	0,000	0
235—240	0	1	0,001	0,001	0,05
240—245	2	3	0,004	0,005	0,24
245—250	1	4	0,01	0,015	0,72
250—255	0	4	0,022	0,037	1,78
255—260	0	4	0,041	0,078	3,74
260—265	0	4	0,065	0,143	6,86
265—270	4	8	0,089	0,232	11,14
270—275	5	13	0,109	0,341	16,37
275—280	9	22	0,119	0,460	22,08
280—285	11	33	0,119	0,579	27,79
285—290	3	36	0,109	0,688	33,02
290—295	2	38	0,093	0,781	37,49
295—300	4	42	0,073	0,754	40,99
300—305	2	44	0,053	0,907	43,54
305—310	1	45	0,037	0,944	45,31
310—315	1	46	0,024	0,968	46,46
315—320	0	46	0,015	0,983	47,18
320—325	0	46	0,008	0,991	47,57
325—330	0	46	0,005	0,996	47,81
330—335	1	47	0,002	0,998	47,90
335—340	0	47	0,001	0,999	47,95
340—345	1	48	0,001	1,0	48

что значительно меньше значения, указанного в табл. IV. Значит, экспериментальные данные подтверждают предположение об экспоненциальном распределении длительности интервалов времени между включениями ЭП, а последнее — о простейшем характере потока включений ЭП.

Ранее полученные [4, 6] и приведенные результаты исследований потоков включений ЭП на вводах сельскохозяйственных предприятий позволяют сделать вывод о том, что независимо от размеров и типа сельскохозяйственного предприятия потоки включений ЭП являются простейшими. Аналогичный вывод можно сделать и по потокам выключений ЭП.

При исследованиях функционирования систем ЭП обнаруживается, что они способны дискретно переходить из одного состояния в другое в произвольные моменты времени. Это позволяет процесс, протекающий в данных системах, считать процессом с непрерывным временем. Процессы дискретных переходов системы из состояния в состояние с непрерывным временем, осуществляемые под влиянием простейших потоков, являются марковскими [18].

Системный подход к выявлению закономерностей формирования ЭН наряду с анализом функционирования системы ЭП требует и его синтеза, в результате которого составляются математические модели формирования ЭН. Установлено, что в зависимости от топологии [14] рассматриваемых систем ЭП может быть разработано несколько математических моделей. Их основу составляют размеченные графы состояний систем и описывающие их системы дифференциальных уравнений [3]. Решение этих систем дифференциальных уравнений приводит к уравнениям Эрланга, Пуассона [2], что дает возможность сделать вывод о соответствующем асимптотическом распределении числа работающих ЭП [4].

Для подтверждения возможности распределения ЭН по закону Пуассона в качестве исходного материала взята суточная реализация силы тока на вводе трансформаторной подстанции № 1 комплекса по откорму

крупного рогатого скота совхоза «Дружба» Вологодской обл., полученная с помощью регистрирующего амперметра. После спрямления регистриrogramмы в получасовых интервалах имеем следующий массив значений силы тока А.

280	280	270	295	245	345	290	280
280	280	270	285	245	315	280	280
280	278	270	305	235	305	280	285
280	270	270	300	275	297	280	285
280	270	270	295	300	280	280	285
280	270	295	245	335	295	280	285

По этим данным составлен вариационный ряд, который представлен в табл. 4. Здесь m_i и m_{ik} — абсолютные и накопленные числа значений силы тока в определенном интервале.

Подбор теоретического распределения, соответствующего вариационному ряду табл. 4, приводит к зависимости вида

$$\omega_i = 11^k / k! e^{11} \quad (3)$$

Абсолютные и накопленные числовые значения теоретического ряда, составленного по выражению (3), сведены в графы 4 и 5 табл. 4, теоретическое распределение значений силы тока — в графу 6.

Оценка степени соответствия теоретического и экспериментального распределения ЭН на вводе названного выше объекта произведена с помощью критерия Колмогорова [15]. Сравнение чисел в графах 3 и 6 показывает, что наибольшее расхождение между статистической и теоретической функциями распределения ЭН имеет место в строке 12 и составляет $d=33 - 27,79=5,21$. Критерий Колмогорова будет равен

$s = d / \sqrt{n} = 5,21 / \sqrt{48} = 0,75$. Руководствуясь табл. X приложения [15] и

интерполируя значения вероятностей, получим $\omega = 0,63$. Такое значение вероятности достаточно велико, поэтому предположение об асимптотическом распределении ЭН на вводах электрифицированных объектов (числа работающих ЭП) по уравнению Пуассона не противоречит экспериментальным данным. Аналогичные результаты получены и по другим электрифицированным объектам [4].

Таким образом, уравнение Пуассона

$$\omega_k = a^k / k! e^{-a} \quad (4)$$

можно использовать при расчетах электрических нагрузок. Для этого нужно знать $a = \lambda t_{ch}$, где λ — плотность потока включений ЭП; t_{cp} — среднее время работы одного ЭП и вероятность появления расчетной нагрузки ω_k .

При использовании закона Пуассона особенно важен выбор значения вероятности расчетной нагрузки. Очень маленькому значению будут соответствовать очень большие нагрузки, которые в процессе эксплуатации электроустановок могут быть редки, что ведет к существенной недогрузке линий электропередачи и трансформаторных подстанций. Выбор больших значений вероятности может привести к чрезмерному занижению расчетных ЭН и к перегрузкам линий электропередачи и трансформаторных подстанций в процессе эксплуатации.

В работе [12] вероятность появления максимальной получасовой нагрузки на вводе электрифицированного объекта равна 0,005. Это значит, что из тысячи зафиксированных значений ЭН в пяти случаях нагрузка будет наибольшей (расчетной). Или из двухсот измерений расчетная нагрузка встретится один раз. Если фиксируются получасовые значения нагрузки, то расчетная нагрузка встретится один раз в течение 100 ч, что соответствует $100/24=4,17$ сут, т. е. при вероятности появления максимума 0,005, если руководствоваться схемой опыта [2], расчетную нагрузку можно зарегистрировать один раз в 4 суток. При этом, естественно, интервал времени, в течение которого регистрируются нагрузки, должен объединять наиболее напряженные смены предприятия.

Результаты статистических исследований ЭН сельскохозяйственных предприятий дают основание вероятности появления расчетных нагрузок

принять равной 0,005. В пользу выбора такого значения вероятности появления расчетной нагрузки свидетельствуют и следующие рассуждения.

При предположении распределения ЭН по нормальному закону, к которому стремятся в пределе многие законы распределения, расчетная нагрузка может быть определена по формуле

$$P_p = P_c + \beta\sigma, \quad (5)$$

где P_p — текущее значение ЭН; P_c — среднее значение ЭН; σ — среднее квадратическое отклонение ЭН; β — принятая кратность рассеяния ЭН.

Значениям β соответствуют определенные значения вероятностей появления расчетных нагрузок.

Если предположить, что расчетные ЭН появляются в диапазоне, ограниченном значениями $\beta = 2,5$ и $\beta = 3$, то, используя нормированную функцию Лапласа [17]

$$\omega(x_1 < x < x_2) = \Phi_0\left(\frac{x_2 - a}{\sigma}\right) - \Phi_0\left(\frac{x_1 - a}{\sigma}\right), \quad (6)$$

можно определить вероятность появления таких нагрузок:

$$\begin{aligned} \omega(P_{p1} < P_{\phi p} < P_{p2}) &= \omega(P_c + 3\sigma < P_{\phi p} < P_c + 2,5\sigma) = \Phi_0\left(\frac{P_c + 3\sigma - P_c}{\sigma}\right) - \\ &- \Phi_0\left(\frac{P_c + 2,5\sigma - P_c}{\sigma}\right) = \Phi_0(3,0) - \Phi_0(2,5), \end{aligned} \quad (7)$$

где $P_{\phi p}$ — фактическое значение расчетной ЭН; P_{p1} и P_{p2} — значения ЭН, соответствующие $\beta = 2,5$ и $3,0$.

По табл. II приложений [17] находим $\Phi_0(3,0) = 0,4986501$, $\Phi_0(2,5) = 0,4937903$.

$$\Phi_0(3,0) - \Phi_0(2,5) = 0,0048598 \approx 0,005.$$

Таким образом, вероятность такого стечения обстоятельств, когда расчетная ЭН появляется в интервале, ограниченном 2,5а и 3,0а, равна 0,005.

Подставляя полученное значение вероятности появления расчетной ЭН в выражение (4), можно получить формулу для определения ЭН. В целях упрощения зависимости (4) использована асимптотическая формула Стирлинга и итерационно-графические приемы. В результате получаются две расчетные зависимости:

$$\begin{aligned} k &= 2,49 a^{0,82} + 2,23 \quad \text{при } a \leq 45. \\ k &= 1,07 a + 13,27 \quad \text{при } a \geq 45. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, задаваясь различными значениями среднего числа работающих ЭП a , связанного с режимами работы ЭП, можно определить число ЭП, участвующих в максимуме, а затем, умножая это число на среднюю мощность одного ЭП, и расчетную ЭН.

Из формул (8) видно, что на значение расчетной ЭН большое влияние оказывает продолжительность работы ЭП. Ввиду этого целесообразно проанализировать эту величину.

В силу самых разнообразных причин продолжительность работы того или иного ЭП неодинакова. Эти причины определяются, во-первых, разнообразием типов ЭП и операций, выполняемых ими; во-вторых, тем, что ЭП имеют различные установленную мощность, производительность, загрузку и т. д.

Существенное изменение продолжительности работы того или иного ЭП связаны также с особенностями технологии производства на сельскохозяйственных предприятиях, где участвуют биологические объекты, влияние которых на производственные процессы в значительной мере случайно. В связи с этим продолжительность работы каждого ЭП является случайной величиной и, следовательно, может быть описана законом распределения

$$F(t_p) = \omega[T < t_p], \quad (9)$$

где t_p — продолжительность работы ЭП.

Вариационные ряды продолжительности работы электроприемников

$\Delta t, ч$	Объект по табл. 1														
	1			2			3			4			5		
	m_i	m_{ih}	w_i	m_i	m_{ih}	w_i	m_i	m_{ih}	w_i	m_i	m_{ih}	w_i	m_i	m_{ih}	w_i
0—2	324	324	0,35	519	519	0,4	18	18	0,07	17	17	0,13	62	62	0,34
2—4	496	820	0,88	759	1278	0,98	83	101	0,38	66	83	0,64	31	93	0,51
4—6	16	834	0,9	17	1295	0,99	94	195	0,73	37	120	0,93	35	128	0,7
6—8	96	930	1,0	1	1296	0,99	71	266	1,0	9	129	1,0	25	153	0,84
8—10				14	1310	1,0							30	183	1,0
	$t_c=2,81$			$t_c=2,23$			$t_c=4,72$			$t_c=3,57$			$t_c=4,26$		

$\Delta t, ч$	Объект по табл. 1														
	6			7			8			9			10		
	m_i	m_{ih}	w_i	m_i	m_{ih}	w_i	m_i	m_{ih}	w_i	m_i	m_{ih}	w_i	m_i	m_{ih}	w_i
0—2	152	152	0,9	120	120	0,14	14	14	0,14	46	46	0,59	76	76	0,25
2—4	14	166	0,99	466	586	0,67	63	77	0,77	24	70	0,89	113	189	0,62
4—6	1	167	0,99	281	867	0,99	17	94	0,94	4	74	0,95	45	234	0,77
6—8	1	168	1,0	2	869	1,0	6	100	1,0	4	78	1,0	55	289	0,95
8—10													16	305	1,0
	$t_c=0,97$			$t_c=3,32$			$t_c=0,33$			$t_c=1,95$			$t_c=3,84$		

Анализ вариационных рядов продолжительности работы ЭП обследованных сельскохозяйственных предприятий (табл. 5) показывает, что эти ряды могут быть аппроксимированы различными законами распределения. По данным табл. 5, вариационные ряды продолжительности работы ЭП объектов 1, 2, 6, 9 носят явно экспоненциальный характер. Это подтверждается подбором теоретического распределения экспоненциального закона и оценкой степени соответствия статистического и теоретического распределений по критерию Пирсона для ЭП, присоединенных к ТП 2 свиноводческого комплекса совхоза «Растовцы» Московской обл. Элементы расчетов представлены в табл. 6.

При $\chi^2=0,211$ и $f=2$ по табл. IV приложения [15] $w=0,9$. У нас же χ^2 несколько меньше табличного значения. Это позволяет считать, что продолжительность работы ЭП на объекте 6 подчиняется экспоненциальному закону.

Для объектов 3, 4, 5, 7, 8, 10 характерно нормальное распределение продолжительности работы ЭП. Для объектов 4, 5, 7, 8, 10 имеет место положительная асимметрия, для объекта 3 — отрицательная.

Таким образом, продолжительность работы ЭП в системе, состоящей из нескольких разнотипных ЭП, может характеризоваться различными функциями распределения, процесс отыскания которых очень трудоемок. Если известен закон распределения продолжительности рабо-

Таблица 6

Оценка степени соответствия теоретического и статистического распределения продолжительности работы ЭП объекта 6

Δt	t/t_c	e^{-t/t_c}	$1 - e^{-t/t_c}$	m_{ih}	nw_r	χ^2
0—2	2,06	0,1275	0,8725	152	146,58	0,2004
2—4	4,12	0,01657	0,98343	166	165,36	0,0025
4—6	6,19	0,002029	0,997971	167	167,66	0,0026
6—8	8,25	0,000249	0,999751	168	167,96	0,0000

Числа электроприемников, участвующих в максимуме, рассчитанные по методу упорядоченных диаграмм (k_{y0}) и по нашей методике (k_e) и их различия (Δk)

n	$k_u = 0,1$			$k_u = 0,15$			$k_u = 0,2$		
	k_{y0}		$\Delta k, \%$	k_{y0}	k_e	$\Delta k, \%$	k_{y0}	k_e	$\Delta k, \%$
4	1,4	2,4	+43	1,9	2,8	+33,2	2,1	3,2	+34,4
20	3,7	5	26,4	5	5,8	+13,8	6	6,6	+9,1
40	6	6,6	+9	8,2	8,4	+2,4	10,2	10	-1,6
60	8	8,4	+4,8	11,3	10,8	-4,2	14,3	13	-10
80	10	10	0	14,4	13	-10,8	18,4	15,8	-16,5
100	12,1	11,5	-5,2	17,6	15	-17,3	22,4	18,5	-21,1
120	14,3	13	-10	20,9	17	-22,9	26,9	21	-28,1
140	16,4	14,2	-15,5	24,2	19	-27,4	31,1	24	-29,6
160	18,6	15,8	-17,7	27,1	21	-29	35,2	26	-35,4
180	20,9	17	-22,9	30,2	23	-31,3	39,6	28,6	-38,5
200	23	18,5	-24,3	33,6	25	-34,4	43,6	31	-40,6
		$\Sigma \Delta k$	-12,4			-127,9			-177,9

n	$k_u = 0,3$			$k_u = 0,4$			$k_u = 0,5$		
	k_{y0}	k_e	$\Delta k, \%$	k_{y0}	k_e	$\Delta k, \%$	k_{y0}	k_e	$\Delta k, \%$
4	2,6	3,7	+30,5	3,0	4,2	+28,6	3,3	4,8	+31,3
20	8	8,4	+4,3	9,9	10	-0,8	12	11,5	-4,3
40	14,3	13	-10	18,4	15,8	-16,5	22,6	18,5	-22,2
60	20,5	17	-20,6	26,9	21	-28,1	33,3	25	-33,2
80	26,6	21	-26,7	35,2	26	-35,4	44	31	-41,9
100	33	25	-32	43,2	31	-39,4	54	37	-45,9
120	39,2	28,6	-37,1	51,4	36	-42,8	64,2	43	-49,3
140	45,4	32	-41,9	59,4	41	-44,9	74,2	49	-51,4
160	51,8	36	-43,9	67,2	54,5	-47,7	84	54,5	-54,1
180	58,3	39,5	-47,6	75,6	50	-51,2	94,5	61,4	-53,9
200	64,2	43	-49,3	84	54,5	-54,1	105	66,8	-57,2
		$\Sigma \Delta k$	-274,3			-332,3			-382,1

n	$k_u = 0,6$			$k_u = 0,7$			$k_u = 0,8$		
	k_{y0}	k_e	$\Delta k, \%$	k_{y0}	k_e	$\Delta k, \%$	k_{y0}	k_e	$\Delta k, \%$
4	3,5	5,4	+35,2	3,6	5,6	+35,5	3,65	5,3	+37,1
20	13,8	13	-6,2	15,5	14,2	-9,2	17	15,8	-7,6
40	26,9	21	-28,1	30,5	24	-27,1	33,6	26	-29,2
60	39,2	28,6	-37,1	44,9	32	-10,3	49,4	36	-37,2
80	51,8	36	-43,9	59,4	41	-44,9	65,9	45,5	-44,8
100	64,2	43	-49,3	73,5	49	-50	81,6	54,5	-49,7
120	77	50	-54	88,2	56,8	-55,3	97,9	64,6	-51,5
140	89	56,8	-56,7	102,9	65,7	-56,6	114,2	73,2	-56
160	100,8	64,6	-56	116,5	73,2	-59,2	130,6	81,8	-59,6
180	113,4	71,1	-59,5	131,0	80,7	-62,3	154,4	90,3	-61
200	126	77,5	-62,6	145,6	88,2	-65,1	161,6	98,9	-63,4
		$\Sigma \Delta k$	-418,2			-434,5			-422,9

$$\Delta k_c = 2582,5/99 = 26,1 \%$$

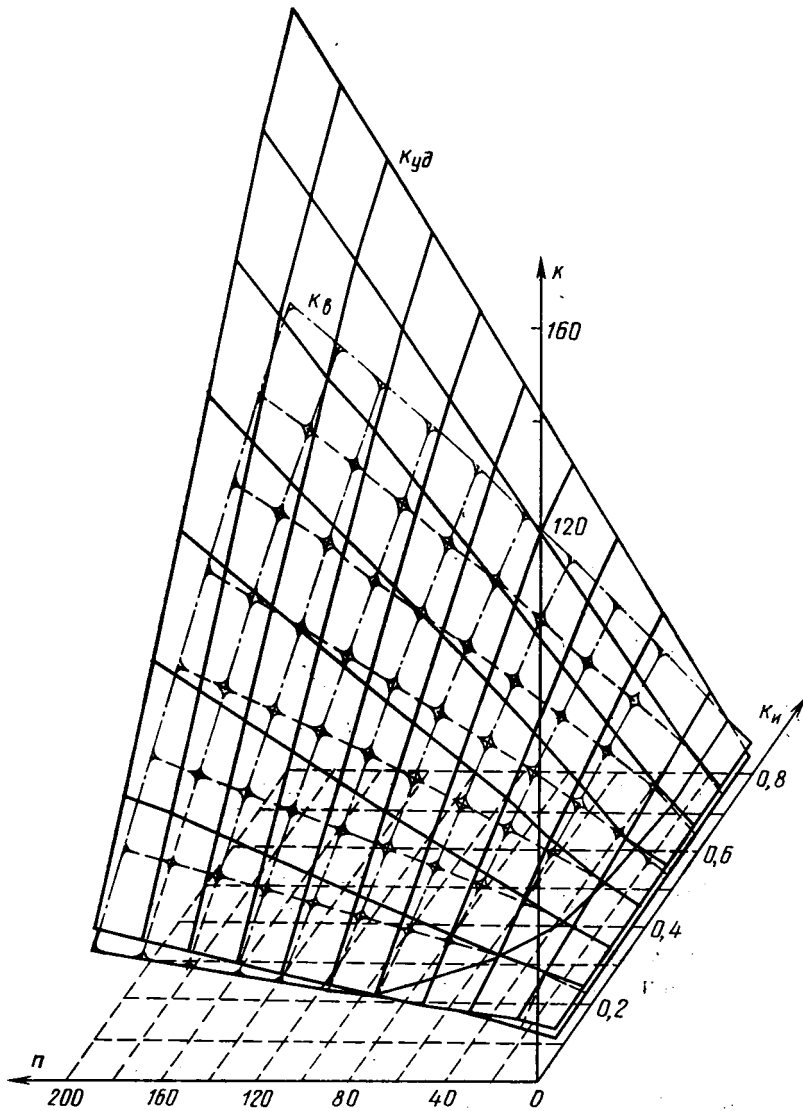


Рис. 3. Взаимное расположение значений числа электроприемников, участвующих в максимуме, которые рассчитаны по методу упорядоченных диаграмм $k_{уд}$ и по методу автора $k_б$.

ты ЭП, то среднюю продолжительность работы одного ЭП можно определить по формуле

$$t_c = \int_0^{\infty} t_p dF(t_p). \quad (10)$$

И этого достаточно для анализа функционирования системы ЭП, как показано [16]. Этой рекомендацией с учетом результатов исследований [7] мы воспользуемся в дальнейшем.

Использование зависимостей (8) в проектной практике неизбежно связано со сравнением их точности с точностью метода упорядоченных диаграмм [19]. Чтобы показать более высокую точность расчетов ЭН при использовании выражений (8), сравним числа ЭП (табл. 7), участвующих в максимуме, рассчитанные по методу упорядоченных диаграмм $k_{уд}$ (по табл. 2—3 [19]) и по выражениям (8) $k_б$ при одинаковых исходных данных. В табл. 7 принято

$$k_u = t_{cp}/T_c; \quad \lambda = n/2T_c, \quad (11)$$

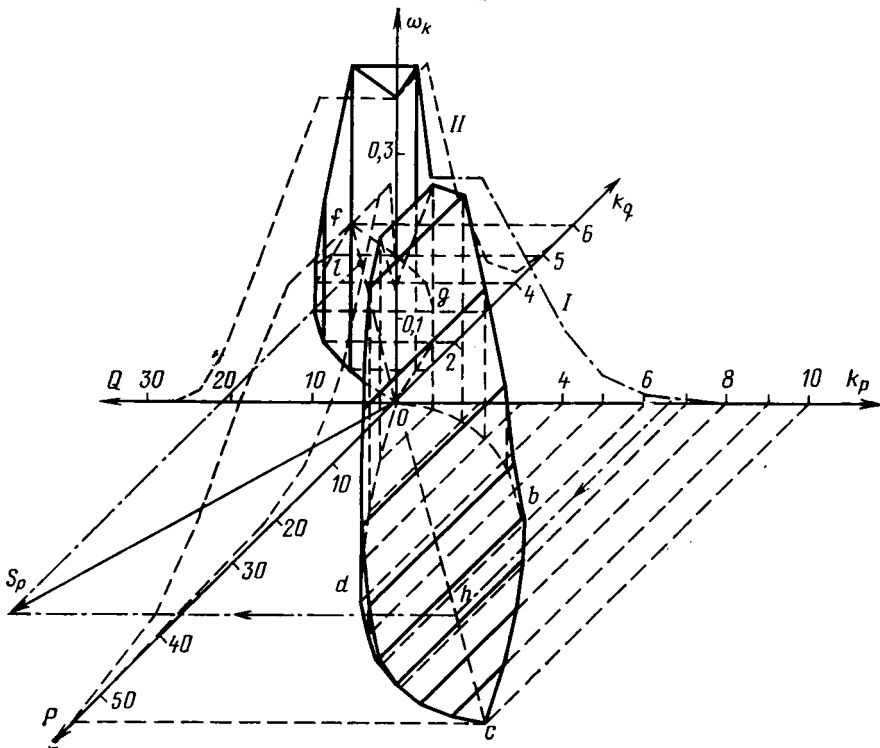


Рис. 4. Теоретические «кристаллы» распределений активных и реактивных нагрузок системы электроприемников.

где k_u — коэффициент использования; t_{cp} — среднее время работы одного ЭП; n — общее число установленных ЭП; T_c — продолжительность смены.

Из данных табл. 7 видно, что существует область, в которой рассчитанные значения $k_{уд}$ и k_v одинаковы, например при $n=80$, k_u — 0,1 и т. д.

При небольших значениях n выражения (8) обеспечивают более высокие значения k , чем метод упорядоченных диаграмм. И наоборот, при больших значениях n выражения (8) дают более низкие значения.

Т а б л и ц а 8

Активные и реактивные мощности группы электроприемников и их расчетные параметры

Показатель	1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	2
Исходные данные											
P , кВт	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	55
$\cos\varphi$	0,78	0,74	1,0	1,0	1,0	0,86	0,86	1,0	0,78	0,74	—
$\operatorname{tg}\varphi$	0,8	0,9	0	0	0,7	0,6	0,6	0	0,8	0,9	—
t_p , ч	5	2	3	4	3	4	6	4	2	1	—
Расчетные данные											
$Q_{квар}$	0,8	1,8	0	0	0	3,6	4,2	0	7,2	9	26,6
$Q_{тр}$	4	3,6	0	0	0	14,4	25,2	0	14,4	9	70,6
$P_{тр}$	5	4	9	16	15	24	42	32	18	10	175
$P_{кmin}$	1	3	6	10	15	21	28	36	45	55	—
P_{kmax}	10	19	27	34	40	45	49	52	54	55	—
$Q_{k min}$	0,8	2,6	—	—	—	6,2	10,4	—	17,6	26,6	—
$Q_{h max}$	9	16,2	—	—	—	20,4	24	—	25,8	26,6	—

* Номер работающего электроприемника.

Значения и количество мощностей звеньев 6 электроприемников

C_6^1 ($P=1$ кВт)		C_6^2 ($P=1$ кВт)		C_6^3 ($P=4$ кВт)		C_6^4 ($P=4$ кВт)		C_6^5 ($P=8$ кВт)		C_6^6 ($P=8$ кВт)	
P	n_c	P	n_c	P	n_c	P	n_c	P	n_c	P	n_c
1	2	2	1	6	2	10	1	18	2	26	1
4	2	5	4	9	1	14	4	22	2		
8	2	8	1	10	2	17	4	25	2		
		9	2	13	8	18	1				
		12	4	16	2	21	4				
		16	1	17	2	24	1				
				20	2						

Соотношение значений k_B и $k_{уд}$ представлено на рис. 3, из которого видно, что в основной массе случаев метод упорядоченных диаграмм дает завышенные результаты. В среднем это завышение по всему массиву данных табл. 7 равно 26,1 %. Если учесть ежегодные многомиллионные затраты на сооружение трансформаторных подстанций завышенной мощности и линий электропередачи с завышенными сечениями, то использование в расчетах ЭН выражений (8) даст ощутимый экономический эффект, который еще больше возрастет при учете распространенности предприятий с большим числом ЭП.

Зависимости (8) дают возможность определить не только активные, но и реактивные и полные расчетные ЭН. В табл. 8 приведен пример такого расчета. Здесь представлены 10 ЭП различных мощностей ($P=1...10$ кВт) с различными коэффициентами мощности $\cos\phi$ и различной продолжительностью работы t_p . По формулам (11) определяем плотность потока включений ЭП активной мощности $\lambda_p = 10/2 \cdot 8 = 0,625$ и плотность потока включений ЭП реактивной мощности $\lambda_g = 6/2 \cdot 8 =$

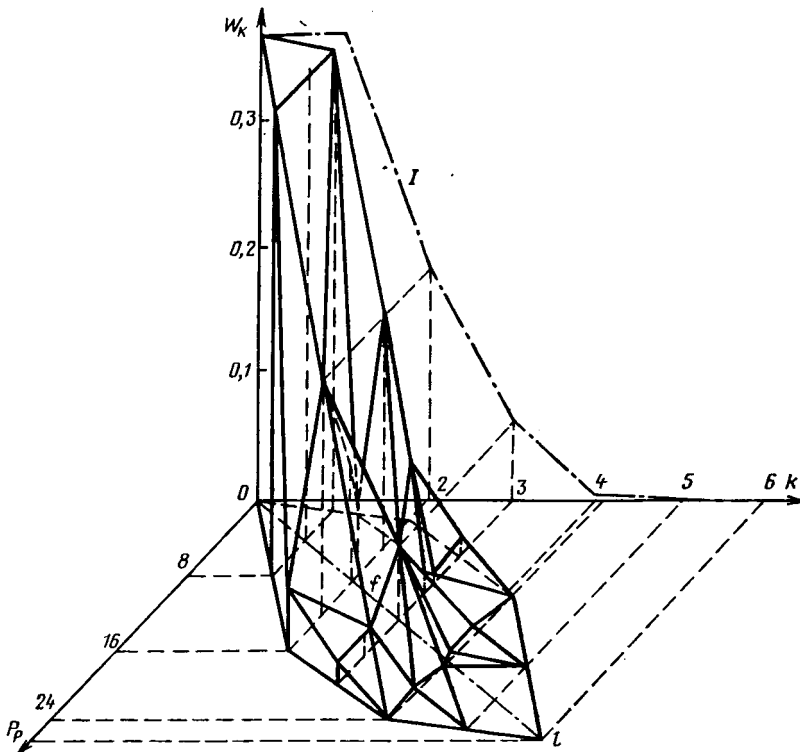


Рис. 5. Теоретический «кристалл» распределения электрических нагрузок.

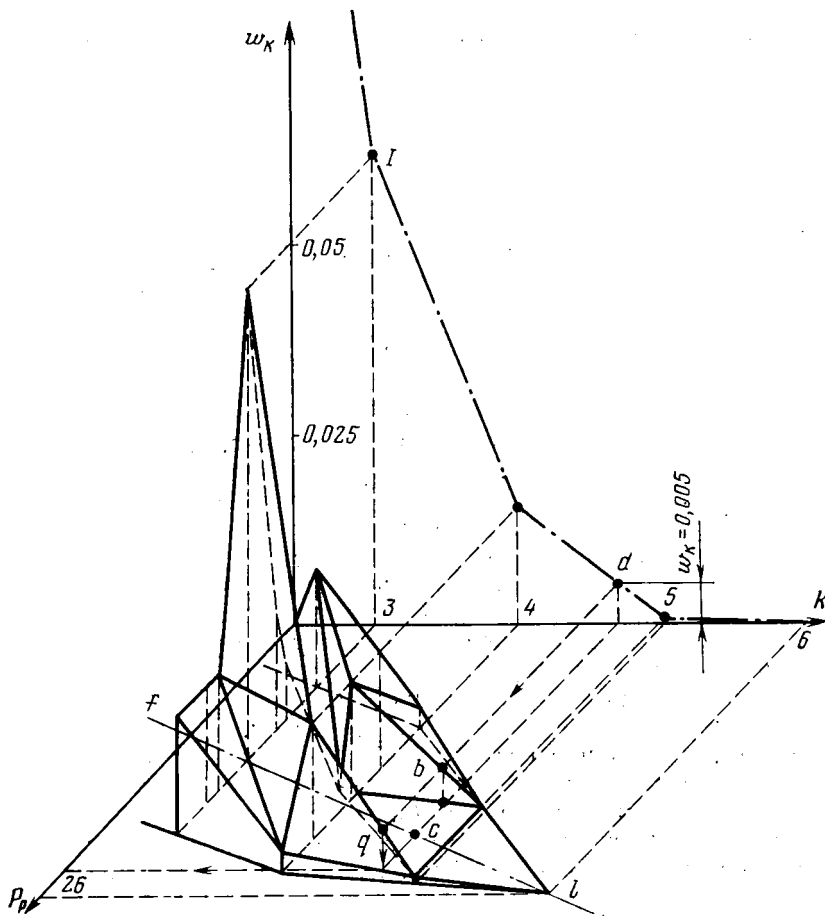


Рис. 6. Увеличенная правая часть «кристалла» нагрузок.

$=0,38$. Соответственно среднее время работы одного ЭП активной мощности $t_{cp} = 175/55=3,18$ и ЭП реактивной мощности $t_{cp} = 70,6/26,6 = 2,65$. Отсюда средние числа работающих ЭП следующие: активных $a_p = 0,625 \cdot 3,18 = 2$ и $a_q = 0,38 \cdot 2,65 \approx 1$.

На рис. 4 в виде ломаных линий I и II показаны распределения Пуассона для активных и реактивных нагрузок.

По выражениям (8) определяем число ЭП активной мощности, участвующих в максимуме $k_p = 6,6$, и ЭП реактивной мощности $k_q = 4,74$. По этим значениям на рис. 4 легко определить максимальные и минимальные значения расчетных активных и реактивных ЭН. Для целей электроснабжения представляют интерес средние нагрузки (точки h и I), проекции которых на оси P и Q дают соответственно $36,3$ кВт и 21 квар. На основании этих данных можно вычислить полную мощность $S = \sqrt{36,3^2 + 21^2} = 41,9$ кВА и $\cos \varphi = 36,3/41,9 = 0,87$.

На рис. 4 показаны также «теоретические кристаллы» активных и реактивных ЭН и граничные кривые на плоскостях $PO\omega_k$ и $QO\omega_k$, представляющие собой очертания плотностей распределения активных и реактивных нагрузок систем ЭП. Эти граничные кривые проливают свет на природу обоснований многочисленными исследованиями характера распределений активных и реактивных ЭН, которые осуществлялись без учета сочетаний мощностей ЭП или «листов» мощностей ЭП. «Листы» активных и реактивных ЭН для данного примера на рис. 4 показаны на плоскостях POk_p и QOk_q . По этим «листам» легко определяются диапазоны нагрузок ЭП и осуществляется переход от дискретного распределения числа работающих ЭП к непрерывному распределению ЭН.

Нам неизвестны литературные источники с аналогичным решением данного вопроса.

Вскрытые закономерности формирования ЭН позволяют выбрать из диапазона возможных значений расчетных ЭН наиболее вероятные. Это обуславливается тем, что мощности сочетаний ЭП, находящиеся в определенном диапазоне, ограниченном минимальными и максимальными их значениями, могут иметь несколько звеньев одинаковых мощностей. В табл. 9 в качестве характерного примера приведены мощности P и число таких звеньев n_c для сочетаний 6 ЭП, которые имеют три значения мощности.

Так как определенное число работающих ЭП может иметь различные мощности, которые встречаются с различной частотой, то целесообразно эти мощности также оценивать по вероятности. Так, в табл. 9 и на рис. 5 одному работающему ЭП соответствуют мощности 1, 4 и 8 кВт (графа 1), которые встречаются по два раза и соответственно имеют одинаковую вероятность. Двум работающим ЭП соответствует 6 мощностей (графа 3), но здесь наиболее вероятными являются нагрузки 5 и 12 кВт и т. д.

С учетом изложенного на рис. 5 и б вероятности сочетаний ЭП представлены ординатами, пропорциональными частоте их появления. На плоскости $\omega_k Ok$ представлена плотность распределения числа работающих ЭП при $a=1$. Таким образом, получается рельефный «теоретический кристалл» распределения ЭН.

При определении расчетной ЭН следует иметь в виду, что вероятности $\omega_k=0,005$ может соответствовать несколько значений нагрузки (рис. 6). Так, для приведенного примера $k=4,7$, k определено по выражению (8), таких значений два (точки b и q), которые находятся на ребрах, соединяющих ординаты наиболее вероятных нагрузок сочетаний C_6^5 и C_6^4 . Так как нас интересует максимальная нагрузка, то следует выбрать самую дальнюю точку от линии средних нагрузок q . Проекция этой точки отстоит от линии средних нагрузок fe минимум на ΔP . Отсюда видна целесообразность определения расчетных ЭН по формуле

$$P_p = kP_{cp} + \Delta P, \quad (12)$$

где k определяется по зависимости (8), а ΔP — минимальная разница между установленными мощностями ЭП.

Использование выражения (12) для определения ЭН сельскохозяйственных предприятий показало, что оно обеспечивает высокую точность расчетов.

Таким образом, системный подход, осуществленный при исследованиях закономерностей формирования ЭН сельскохозяйственных предприятий, позволил установить новые зависимости, повышающие точность определения электрических нагрузок и эффективность использования электрооборудования, применяемого в системе электроснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев И. Г., Пястолова А. А. Нагрузка трансформаторов сельских сетей. — Тр. ЧИМЭСХ, вып. 106, Челябинск, 1975, с. 57, 58. — 2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. — 3. Вентцель Е. С. Исследование операций. — М.: Наука, 1980. — 4. Воробьев В. А. Распределение числа работающих электроприемников на сельскохозяйственном предприятии. — Изв. ТСХА, 1982, вып. 4, с. 157—164. — 5. Воробьев В. А. Расчет электрических нагрузок на вводах животноводческих объектов. Изв. ТСХА, 1986, вып. 1, с. 173—178. — 6. Воробьев В. А. Особенности работы электроприемников сельскохозяйственного предприятия. — Механизация и электрификация сельск. хоз-ва, 1984, № 5, с. 40—44. — 7. Климов Г. П. Стохастические системы обслуживания. — М.: Наука, 1966. — 8. Кудрин Б. И. Исследование технических систем как сообществ изделий — техноценозов. — В кн.: Системные исследования. Ежегодник. М.: Наука, 1980, с. 236—254. — 9. Кудрин Б. И. Основы комплексного метода расчета электрических нагрузок. — Промышленная энергетика, 1986, № 11, с. 23—27. — 10. Мельников С. В. Технологическое оборудование животноводческих ферм и комплексов. — Л.: Агропромиздат. — 11. Методические указания по расчету электрических нагрузок в сетях 0,38—110 кВ сельскохозяйственного назначения. — РУМ—81. М.: Сельэнергопроект,

1981, — 12. Мешель Б. С. О выборе расчетной вероятности максимума. — Электричество, 1962, № 4, с. 30—32. — 13. Никаноров С. П. Системный анализ и системных подход.— В кн.: Системные исследования. Ежегодник. М.: Наука, 1971, с. 55—71, — 14. Орел О. Теория графов. М.: Наука, 1980, — 15. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. — М.: Наука, 1968. — 16. Севастьянов Б. А. Эргодическая теорема для марковских процессов и ее приложение к телефонным системам с отказами. — В сб.: Теория вероятностей и ее применение 1957, т. 2, вып. 1, с. 67—74. — 17. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. — М.: Наука, 1965. — 18. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. — М.: Советское радио, 1977. — 19. Федоров А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий. — М.: Энергия, 1972.

Статья поступила 25 февраля 1987 г.

SUMMARY

Experimental confirmation of the simplest nature of electric receiver switching on sequence at farm enterprises lead-in is presented in the paper. Various nature of distributing the working period of electric receivers at different farm enterprises is demonstrated. A new original dependence of electric load on the number of operating electric receivers and their power is established.