Известия ТСХА, выпуск 1, 1980 год

УДК 63:621.311.519.21

К РАСЧЕТУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В. А. ВОРОБЬЕВ
(Кафедра электрификации сельскохозяйственного производства)

Наиболее важными электроэнергетическими показателями сельскохозяйственных предприятий являются электрические нагрузки, расчет которых на всех ступенях электрических проводок и сетей сельскохозяйственных предприятий — одна из первых и основополагающих частей проектирования электроснабжения.

Как известно, от электрических нагрузок зависят технические характеристики элементов электрических проводок и сетей — сечения и марки проводов, параметры коммутационной и защитной аппаратуры, мощности и типы 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, сокращению срока их службы.

До настоящего времени расчеты электрических нагрузок сельскохозяйственных предприятий производились по «Методике определения электрических нагрузок для расчета электрических сетей сельскохозяйственного назначения» [6]. Однако в условиях интенсивного перевода сельскохозяйственного производства на промышленную основу применение указанной методики приводит к завышению расчетных нагрузок по сравнению с фактическими в 1,5—2 раза. Вследствие этого в целом ряде научно-исследовательских институтов приступили к изучению электрических нагрузок сельскохозяйственных предприятий и режимных характеристик электропотребления на животноводческих комплексах с целью совершенствования существующих методов расчета. Результатом этой работы явились «Рекомендации по определению электрических нагрузок животноводческих комплексов» [7], которые характеризуются повышенной точностью по сравнению с существующими, однако в них почти не учитывается случайная природа формирования электрических нагрузок сельскохозяйственных предприятий, в связи с чем в указанные методы придется систематически вносить уточнения.

На кафедре электрификации сельскохозяйственного производства Тимирязевской академии в течение ряда лет проводятся исследования электрических нагрузок сельскохозяйственных предприятий с широким использованием методов теории вероятностей, математической статистики и теории массового обслуживания [2, 5], позволяющих с большой точностью описать закономерности формирования электрических нагрузок.

В результате применения указанных методов получен ряд оригинальных зависимостей, существенно упрощающих и уточняющих способы расчета электрических нагрузок сельскохозяйственных предприятий [3, 4].

Одну из таких зависимостей отражает формула

$$w_{\text{к}} = \frac{a^{\text{к}}}{k! e^{a}}, \quad k = 0, 1, 2, \ldots, n, \tag{1}$$

которая связывает вероятность включения электроприемников $w_{\text{к}}$ со средним их значением a. Однако для расчетов электрических нагрузок сельскохозяйственных предприятий неудобно пользоваться формулой (1), поскольку приходится по известным значениям a и $w_{\text{к}}$ отыскивать неизвестное значение k (квантиль k), т. е. число электроприемников, участвующих в максимуме электрических нагрузок. Кроме того, формула (1) представляет собой неявно заданную функциональную зависимость числа электроприемников k от их среднего числа и заданной вероятности включения $w_{\text{к}}$.

Чтобы получить явную функциональную зависимость k от a и $w_{\text{к}}$, сначала заменим в знаменателе формулы (1) факториал $k!$ более удобной зависимостью в соответствии с асимптотической формулой Стирлинга

$$x! \approx \left(\frac{x}{e}\right)^{x} \sqrt{2\pi x}, \tag{2}$$

Использование этой формулы дает тем более точные результаты, чем больше значение k.

В результате такой подстановки получим зависимость

$$w_{\text{к}} \approx \frac{a^{\text{к}} e^{\text{к}}}{k^{\text{к}} e^{a} \sqrt{2\pi k}} \approx \frac{a^{\text{к}} e^{\text{к}-a}}{k^{\text{к}} \sqrt{2\pi k}}. \tag{3}$$

Таким образом, зависимость (3) уже не содержит факториала неизвестной величины k. Затем прологарифмируем выражение (3) и получим зависимость

$$\lg w_{\text{к}} \approx k \lg a + (k - a) \lg e -$$

$$- k \lg k - \frac{1}{2} \lg 2\pi - \frac{1}{2} \lg k\,. \qquad (4)$$

После подстановки конкретных значений $w_{\text{к}} = 0{,}005$ и $2\pi = 6{,}2832$ будем иметь

$$k \lg a + (k - a)\, 0{,}4343 - 1{,}5\, k \lg k + 1{,}9019 \cong 0. \quad (5)$$

Данное уравнение является трансцендентным, решить которое можно лишь приближенно. В зависимости от наличия вычислительных возможностей это уравнение можно преобразовать в уравнение любой степени, производя замену логарифма степенным рядом, согласно одной из следующих формул:

$$\ln x = 2\left[\frac{x-1}{x+1} + \frac{(x-1)^3}{3(x+1)^3} + \frac{(x-1)^5}{5(x+1)^5} + \cdots + \frac{(x-1)^{2n+1}}{(2n+1)(x+1)^{2n+1}} + \cdots\right]$$

$$\text{при } x > 0, \qquad (6)$$

$$\ln x = \frac{x-1}{x} + \frac{(x-1)^2}{2x^2} + \frac{(x-1)^3}{3x^3} + \cdots + \frac{(x-1)^n}{nx^n} + \cdots \quad \text{при } x > \frac{1}{2}\,. \quad (7)$$

Для этого, естественно, нужно предварительно прологарифмировать (3) по основанию натуральных логарифмов e и затем, беря нужное число слагаемых в (6) и (7), решать уравнения высоких степеней. В нашем случае этот путь оказался малоэффективным и мы применили итерационно-графический способ решения уравнения (5).

Этот способ заключается в следующем. Предварительно задаемся определенными значениями k, например, в нашем случае 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 и 60. Подставляя в формулу (5) определенное значение k, получим уравнение, общий вид которого записывается следующим образом:

$$b \lg a - ca = d, \qquad (8)$$

где b, c и d — постоянные величины.

Сначала строим график этой зависимости, по которому грубо (ориентировочно) определяем значение a.

Путем подбора значений a добиваемся равенства левой и правой частей этого уравнения. Значение a, определенное таким способом, соответствует заданному значению k.

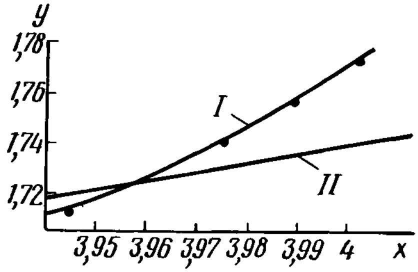

Рис. 1. Графическое решение уравнения (8).

В качестве примера приводим расчет a для $k = 10$.

Подстановка $k = 10$ в формулу (5) дает уравнение

$$10 \lg a - 0{,}4343a = 4{,}2551.$$

По графику берем $a = 4{,}67$. Вычисления показывают $0{,}6693 \cdot 10 - 0{,}4343 \cdot 4{,}67 = 6{,}693 - 2{,}0282 = 4{,}6648 > 4{,}2551$. Делаем следующий шаг, т. е. берем $a = 4$,

$$0{,}6021 \cdot 10 - 0{,}4343 \cdot 4 = 4{,}2838 > 4{,}2551.$$

Затем следующий шаг: $a = 3{,}95$,

$0{,}5966 \cdot 10 - 0{,}4343 \cdot 3{,}95 = 4{,}2405 < 4{,}2551$.

Строим на графике (рис. 1) кривую $10 \lg a$ и прямую $0{,}4343a$; ориентировочно определяем $a = 3{,}957$. Выполняем проверочный расчет:

$0{,}5974 \cdot 10 - 0{,}4343 \cdot 3{,}957 = 5{,}974 - 1{,}7185 = 4{,}2555 > 4{,}2551$, уточняем $a = 3{,}956$. При этом $0{,}5973 \cdot 10 - 0{,}4343 \cdot 3{,}956 = 5{,}973 - 1{,}7181 = 4{,}2549$, что наиболее близко подходит к значению 4,2551.

Аналогичным образом вычисляем и другие значения a, соответствующие заданным значениям k. Результаты вычислений заносим в табл. 1.

Нанося данные таблицы на координатную плоскость, получаем кривую зависимости $k = f(a)$, которая имеет незначительную кривизну и выпуклость, направленную вверх.

Теперь нужно табличную форму задания зависимости $k = f(a)$ преобразовать в форму, имеющую вид уравнения. Поиски функции, аппроксимирующей табличные значения зависимости $k = f(a)$, приводят к уравнению вида

$$j = bx^c + d, \qquad (9)$$

где b, c и d — постоянные величины.

Чтобы убедиться в применимости уравнения этого вида для описания зависимости

Таблица 1

Зависимость числа электроприемников, участвующих в максимуме, от среднего числа, a

k	5	10	15	20	30	40	50	60
a	1,128	3,956	7,374	11,09	1[illegible],03	27,40	36,02	44,80

Таблица 2

К расчету параметров зависимости $k = f(a)$

Показатели	a							
	1,128	3,956	7,374	11,09	19,03	27,4	36,02	44,8
$x = \lg a$	0,0522	0,5977	0,8677	1,0449	1,2795	1,4378	1,5565	1,6513
k	5	10	15	20	30	40	50	60
$k - d$	2,77	7,77	12,77	17,77	17,77	37,77	47,77	57,77
$Y = \lg(k - d)$	0,4425	0,8904	1,1062	1,2497	1,4436	1,5771	1,6791	1,7617

$k=f(a)$, выполним дополнительные расчеты, результаты которых приведены в табл. 2.

В этой таблице значение d определяется по формуле

$$d = \frac{k_1 k_5 - k_5^2}{k_1 + k_5 - 2k_{15}}, \qquad (10)$$

где k_1 и k_5 — порядковые значения ординат (k) в таблице, которым соответствуют значения абсцисс (a_1 и a_5); k_{15} — ордината, которая определяется по графику рис. 2 на основании абсциссы

$$a_{15} = \sqrt{a_1 a_5}$$

Значения абсцисс обычно выбирают произвольно [1], однако в нашем случае пришлось перебрать несколько пар абсцисс с тем, чтобы функциональная зависимость лучше отражала данные табл. 1.

Расчетные значения для выражения (10) следующие:

$$a_1 = 1{,}128;\ k_1 = 5;\ a_5 = 19{,}03;\ k_5 = 30;$$

$$a_{15} = \sqrt{1{,}128 \cdot 19{,}03} = \sqrt{21{,}4658} = 4{,}634.$$

По рис. 2 определяем $k_{15} = 11$,

$$d = \frac{5 \cdot 30 - 121}{5 + 30 - 22} = \frac{29}{13} = 2{,}23.$$

Значения X и Y откладываем по осям системы координат на (рис. 3): $\lg a$ — по оси абсцисс; $\lg(k—d)$ — по оси ординат.

Как видно из рис. 3, все точки зависимости $\lg(k—d) = f(\lg a)$ лежат на одной прямой. Это подтверждает возможность аппроксимации искомой зависимости формулой (9).

Для определения коэффициентов b, c, d логарифмируем выражение (9), в результате чего получаем

$$\lg Y = \lg b + cX, \quad \text{или}$$

$$\lg(k—d) = \lg b + c \lg a. \qquad (11)$$

Значения $\lg b$ и c можно определить по рис. 3.

Однако более точные результаты получатся при использовании метода наименьших квадратов. Наша задача облегается в связи с тем, что уравнение $k=f(x)$ отображает прямую зависимость вида

$$y = ax + b. \qquad (12)$$

Использование способа наименьших квадратов предусматривает необходимость составления уравнений

$$\gamma - \sum_{i=1}^{n} (ax_i + b - y_i)^2, \qquad (13)$$

где x_i — значения абсцисс функции; y_i — значения ординат функции; a и b — искомые коэффициенты.

Как известно, в основе способа наименьших квадратов лежит принцип: искомыми значениями a и b являются те, при которых сумма квадратов разности ординат эмпири-

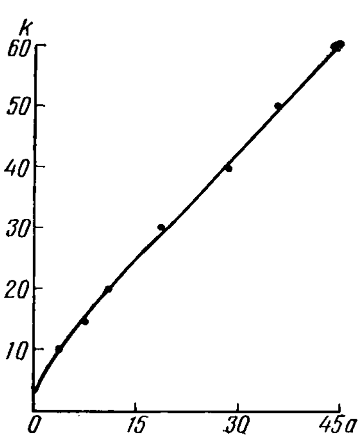

Рис. 2. Зависимость $k = f(a)$.

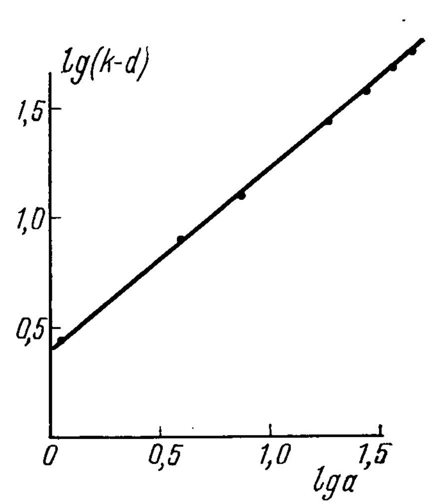

Рис. 3. Расчетная зависимость $\lg Y = cX + B$.

ческой и искомой функций оказывается наименьшей. Так как γ зависит от a и b, то искомые a и b определяем из системы уравнений

$$\frac{\partial\gamma}{\partial a}=0;\quad \frac{\partial\gamma}{\partial b}=0, \qquad (14)$$

т. е. для отыскания минимума функции $y=\gamma(a,\ b)$ необходимо взять частные производные по a и b и приравнять их нулю [2].

Применительно к условиям и обозначениям нашей задачи уравнение (13) будет иметь вид

$$\gamma=\sum_{i=1}^{8}[c\lg a+\lg b+\lg(k-d)]^2 \qquad (15)$$

а уравнения (14)

$$\frac{1}{2}\,\frac{\partial\gamma}{\partial c}=\sum_{i=1}^{8}[c\lg a+B+\lg(k-d)]\lg a=0, \qquad (16)$$

$$\frac{1}{2}\,\frac{\partial\gamma}{\partial B}=\sum_{i=1}^{8}[c\lg a+B-\lg(k-d)]=0, \qquad (17)$$

здесь для удобства обозначено $\lg b=B$.

Для решения уравнений (16) и (17) берем данные из табл. 2.

В результате выполнения умножения сомножителей и сложения этих уравнений имеем

$$\left.\begin{array}{l}11{,}0585c+8{,}4876B-12{,}4582=0\\ 8{,}4876c+8B-10{,}1503=0\end{array}\right\} \qquad (18)$$

Решим данную систему уравнений. Из второго уравнения имеем

$$B=\frac{10{,}1503-8{,}4876c}{8}.$$

Подставляем это значение в первое уравнение системы (18) и получаем

$$11{,}0585c+\frac{8{,}4876\,(10{,}1503-8{,}4876c)}{8}-$$
$$-12{,}4582=0.$$

Откуда $88{,}468c+86{,}1517-72{,}0394c-99{,}6656=0$; $16{,}4286c=13{,}5139$; $c=0{,}8226$,

$$B=\frac{10{,}1503-8{,}4876\cdot0{,}8226}{8}=$$
$$=\frac{10{,}1503-6{,}9819}{8}=0{,}3961.$$

Полученные значения c и B хорошо согласуются с данными графика рис. 3, где можно видеть, что прямая, характеризующая зависимость $\lg Y=cX+B$, отсекает от оси ординат величину 0,4, а это очень близко к 0,3961. Соответственно угол наклона указанной прямой примерно равен 39,5°, тангенс которого также близок к значению 0,8226.

Так как $B=\lg b$, то потенцируя, получаем $b=2{,}49$.

Таким образом, зависимость числа электроприемников, участвующих в максимуме, от среднего числа включенных электроприемников имеет вид

$$k=2{,}49a^{0{,}8226}+2{,}23. \qquad (19)$$

При расчетах по формуле (19) могут получаться дробные значения k, которые должны быть округлены до целого числа.

Для проверки достигаемой точности при использовании уравнения (19) производим расчет k по имеющимся в табл. 2 значениям a и сравниваем результаты, которые представлены в табл. 3.

Как видно из этой таблицы, уравнение (19) достаточно точно аппроксимирует зависимость $k=f(a)$ при величине $w_k=0{,}005$, так как самое большое расхождение значений k, рассчитанных по формулам (5) и (19), не превышает 1,58 %.

На основе установленной зависимости (20) можно перейти к расчету электрических нагрузок проектируемых сельскохозяйственных предприятий, например животноводческих комплексов.

Обычно бывают известными удельные нормы потребления электрической энергии, приходящиеся на одну голову скота или единицу выпускаемой продукции. В случае новых комплексов, норм для которых еще не разработано, можно воспользоваться данными аналогичных работающих комплексов по удельному потреблению электроэнергии. Для этого нужно знать годовое потребление электроэнергии, поголовье скота или объем выпускаемой продукции. Расчет ведется по формулам

$$A_p=A_k/p_p;\ A_v=A_k/V_p, \qquad (20)$$

где A_p, A_v, A_k — количество электрической энергии за год, приходящееся соответственно на 1 гол. скота, на единицу произведенной продукции, потребленное работающим комплексом; p_p — поголовье скота; V — объем продукции;

Таблица 3

Сравнение расчетных данных, полученных по формулам (5) и (19)

Показатели	a							
	1,128	3,956	7,374	11,09	19,03	27,4	36,02	44,8
k_I	5	10	15	20	30	40	50	60
k_{II}	4,978	9,953	15,11	20,24	30,32	40,14	49,70	59,05
Δ	—0,022	—0,047	0,11	0,24	0,32	0,14	—0,3	—0,95
Δ %	—0,44	—0,47	0,73	1,2	1,07	0,35	—0,6	—1,58

Зная удельное потребление электрической энергии за год на 1 гол. или на единицу производимой продукции, можно определить годовое потребление электрической энергии вновь проектируемым комплексом при условии одинаковости применяемых технологий на работающем и проектируемом комплексах. Этот расчет ведется по формулам

$$A_{\text{к}}^{\text{п}} = A_{\text{р}} p_{\text{п}};\ A_{\text{к}}^{\text{п}} = A_{\text{v}} V_{\text{п}}, \qquad (21)$$

где $A_{\text{к}}^{\text{п}}$ — годовое потребление электрической энергии проектируемым комплексом; $p_{\text{п}}$ — поголовье скота; $V_{\text{п}}$ — планируемый объем продукции.

На основании данных о годовом электропотреблении проектируемого комплекса рассчитываем среднюю суточную мощность комплекса

$$P_{\text{ср.сут}} = A_{\text{к}}^{\text{п}}/365 \cdot 24. \qquad (22)$$

На проектируемом комплексе обычно бывает известно число установленных электроприемников и их мощность. Используя эти данные, определяем среднюю мощность одного электроприемника по формуле

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{уст}}/n_{\text{уст}} = \sum_{i=1}^{n} P_{\text{н}i}/n_{\text{уст}}, \qquad (24)$$

где $P_{\text{уст}}$ — суммарная установленная мощность всех электроприемников; $P_{\text{н}i}$ — установленная мощность i-го электроприемника; $n_{\text{уст}}$ — число установленных электроприемников.

В дальнейшем используется зависимость, связывающая число электроприемников, участвующих в максимуме, со средним числом работающих электроприемников (19).

Используя данные по проектируемому комплексу: среднюю мощность за сутки и среднюю мощность одного электроприемника — определяем среднее число работающих электроприемников

$$a = P_{\text{ср.сут}}/P_{\text{ср}}. \qquad (24)$$

По формуле (19) определяем число электроприемников, участвующих в максимуме k, а затем и максимальную (расчетную) нагрузку

$$P_{\text{р}} = kP_{\text{ср}}. \qquad (25)$$

Если подставить все промежуточные формулы в зависимость, (19), то получим окончательную формулу

$$P_{\text{р}} = \frac{P_{\text{уст}}}{n_{\text{уст}}} \times \left[2{,}49\left(\frac{A_{\text{к}}^{\text{п}} \cdot n_{\text{уст}}}{365 \cdot 24 \cdot P_{\text{уст}}}\right)^{0{,}8226} + 2{,}23\right]. \qquad (26)$$

В этой формуле используются данные: $P_{\text{уст}}$ — установленная мощность электроприемников, кВт; $n_{\text{уст}}$ — число электроприемников; $A_{\text{к}}^{\text{п}}$ — годовое потребление электрической энергии проектируемым комплексом. Четыре коэффициента являются постоянными и не зависят от размеров и типа сельскохозяйственного предприятия.

Выводы

1. Представление сельскохозяйственного электрифицированного предприятия системой массового обслуживания дало возможность получить зависимость числа электроприемников, участвующих в максимуме, от их среднего числа.

2. Впервые предложена формула, связывающая нормы электропотребления эксплуатируемых сельскохозяйственных предприятий, параметры установленных электроприемников и расчетные электрические нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М., Физматгиз, 1959. — 2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1964. — 3. Воробьев В. А. Исследование взаимосвязей параметров электрических нагрузок. — Изв. ТСХА, 1972, вып. 5, с. 179—187. — 4. Воробьев В. А. Исследование распределений электрических нагрузок сельскохозяйственных потребителей. — Изв. ТСХА, 1974, вып. 2, с. 188—195. — 5. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. М., «Наука», 1966. — 6. Методика определения электрических нагрузок для расчета электрических сетей с.-х. назначения. М., Сельэнергопроект, РУМ № 8, 1971. — 7. Рекомендации по определению электрических нагрузок животноводческих комплексов. М., Сельэнергопроект, 1976.

Статья поступила 7 мая 1979 г.

SUMMARY

A simplified formula of variation of the number of electricity receivers participating in the maximum with the average number of operating electricity receivers is presented in the paper. On the base of this formula and electric energy indices the established power, the number of electricity receivers and the annual consumption of electricity at a farm enterprise — the estimated electric pressure is determined.