

И. Ф. КУДРЯВЦЕВ,

доктор технических наук;

Э. В. БАРАНОВСКИЙ, В. А. ЛАЗОВСКИЙ,

инженеры

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВНУТРЕННИХ ЭЛЕКТРОПРОВОДОВ НА ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМАХ

Изучение опыта эксплуатации внутренних электропроводок на животноводческих фермах показано, что основная масса отказов происходит вследствие неисправности изоляции. Старение и увлажнение ее вызывают увеличение токов утечки и вероятность появления коротких замыканий. Проникновение агрессивной среды животноводческих помещений через изоляцию приводит к ускорению коррозии жил проводов и мест их соединений, вызывая перегрев и обрывы. Наиболее подвержены разрушению контакты в соединениях, выполненных скруткой, на болтах и подобными способами. Сварные соединения наиболее надежны и долговечны, хорошо себя зарекомендовали в помещениях животноводческих ферм.

В настоящей работе проводится краткий анализ причин неисправностей внутренних электропроводок на животноводческих фермах с целью повышения их долговечности. В работе представлены результаты обследований в хозяйствах и лабораторные испытания изоляции проводов и мест их соединений.

Под эксплуатационной надежностью внутренних электропроводок животноводческих ферм понимается их способность бесперебойно подводить электрическую энергию к энергоприемникам, сохраняя эксплуатационные показатели в пределах, заданных техническими условиями и «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ) в течение требуемого промежутка времени.

Пригодность электропроводок к работе в условиях эксплуатации определяется главным образом электрической прочностью и сопротивлением изоляции, электрическим сопротивлением токоведущих жил и контактов.

Длительность эксплуатации электропроводок в животноводческих помещениях определялась по календарной продолжительности их эксплуатации. Вследствие неоднородности строения изоляции ее электрическая прочность подвержена статистическими отклонениями. Величину и закономерность распределения электрической прочности можно установить из опыта испытания изоляции напряжением. В качестве примера приведем результаты испытаний 50 образцов не бывшего в эксплуатации провода типа АПВ сечением $2,5 \text{ мм}^2$.

Имея значение пробивных напряжений для общего количества испытанных образцов N , подразделяем полученные значения пробивных напряжений на небольшие одинаковые интервалы. Находим для каждого интервала средние пробивные напряжения U_i и количество образцов m_i , пробитых при напряжениях, лежащих в данном интервале, без учета образцов, пробитых в предыдущих интервалах напряжений. Вычисляем в процентах отношение $\varphi_i = \frac{m_i}{N} \cdot 100$, которое характеризует плотность распределения U_i по интервалам.

Результаты опыта и расчета приведены в табл. 1. Их графическая интерпретация показывает, что распределение пробивного напряжения изоляции относительно его средневзвешенного значения $U_{\text{ср}}$ симметрично. Начиная от максимума функции плотность распределения пробивных напряжений снижается, асимптотически приближаясь к оси абсцисс.

Полученная кривая f (рис. 1) близка к нормальному закону распределения. Количественную оценку согласия эмпирического и теоретического распределений пробивного напряжения изоляции проведем с помощью критерия А. Н. Колмогорова. Из рис. 1 определяем наибольшее отклонение $D = 0,015$ и вычисляем величину $D\sqrt{N} = 0,015 \cdot \sqrt{50} = 0,106$. Таким образом, $D\sqrt{N} < 1$. Это означает, что согласие эмпирического распределения пробивного напряжения изоляции с теоретическим удовлетворительное [1].

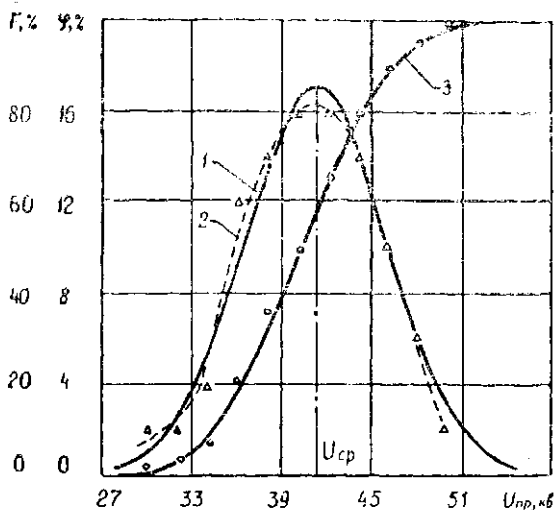


Рис. 1. Распределение пробивных напряжений изоляции установочных проводов типа АИВ.

В общем виде плотность распределения вероятностей пробивного напряжения выражается [2] формулой

$$f(U_i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(U_i - U_{cp})^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где U_i — измеряемое пробивное напряжение, кВ;

U_{cp} — среднее значение, кВ;

σ — среднее квадратическое отклонение, кВ.

Вычисляем средневзвешенное значение пробивного напряжения:

$$U_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i m_i}{N} = \frac{2060}{50} = 41,2.$$

Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - U_{cp})^2 m_i}{N - 1}} = \sqrt{\frac{1027}{49}} = 4,61.$$

Таблица 1

Показатели надежности изоляционных конструкций
внутренних электропроводок животноводческих ферм

Интервал пробивных напряжений, кВ	Средняя интервала U_i , кВ	Количество образцов, пробитых в данном интервале n_i	Процент образцов, пробитых в данном интервале φ_i , %	Образцы, пробитые в данном и во всех предыдущих интервалах F_i , %	U_i , м μ	$U_i - U_{cp}$	$(U_i - U_{cp})^2 n_i$
29,01 - 31	30	1	2	2	30	11,2	125,3
31,01 - 33	32	1	2	4	32	9,2	84,6
33,01 - 35	34	2	4	8	68	7,2	103,4
35,01 - 37	36	6	12	20	216	5,2	162,0
37,01 - 39	38	7	14	34	266	3,2	71,4
39,01 - 41	40	8	16	50	320	1,2	11,5
41,01 - 43	42	8	16	66	336	0,8	5,1
43,01 - 45	44	7	14	80	308	2,8	54,8
45,01 - 47	46	5	10	90	230	4,8	115,0
47,01 - 49	48	3	6	96	144	6,8	139,0
49,01 - 51	50	2	4	100	100	8,8	155,0
Итого...		50			2060		1027

Подставив полученные значения U_{cp} и σ в формулу (1), после преобразований находим

$$\varphi(U_i) = 0,0866 e^{-\frac{(U_i - 41,2)^2}{42,5}} \quad (1')$$

Построенная по формуле (1) кривая 2, которая представлена на рис. 1, позволяет определить по величине пробивного напряжения плотность его распределения. Для различных условий, длительности эксплуатации и типа изоляции проводов численные выражения U_{cp} и σ в формуле (1) будут разные.

Вероятность пробоя изоляции определим [2] из интегральной функции распределения

$$F(U_i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{U_i} e^{-\frac{(U_i - U_{cp})^2}{2\sigma^2}} dU_i \quad (2)$$

Для нашего случая интегральную функцию распре-

ления пробивного напряжения получим, проинтегрировав уравнение (1'):

$$F(U_i) = 0,0866 \int_0^{U_i} e^{-\frac{(U_i - 41,2)^2}{42,5}} dU_i. \quad (2')$$

Эта функция представлена на рис. 1 кривой 3.

Вероятность отсутствия пробоя изоляции вычислим по формуле

$$1 - F(U_p) = \Phi(U_p), \quad (3)$$

где U_p — действующее значение напряжения в номинальном режиме работы.

Для получения значения вероятности безотказной работы вычислим относительную точность ϵ , с которой определено среднее значение пробивного напряжения.

$$\epsilon' = t_p \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = 2,68 \frac{4,61}{\sqrt{50}} = 1,75 \text{ (кВ)},$$

где t_p — величина, значение которой зависит от доверительной вероятности и числа испытанных образцов. Если доверительная вероятность $p = 0,99$, тогда по [2, табл. 5] найдем $t_p = 2,68$.

В относительных единицах

$$\epsilon = \frac{\epsilon'}{U_{\text{ср}}} = \frac{1,75}{41,2} = 0,0425.$$

Сделаем допущение, что вероятность безотказной работы $F(U_p)$ является надежностью, то есть

$$\Phi(U_p) = P. \quad (4)$$

Это утверждение справедливо, если число испытанных образцов весьма велико. При конечном числе образцов надежность всегда меньше вероятности безотказной работы на величину доверительного интервала $U_{\text{ср}} \pm \epsilon$, который тем больше, чем больше требуемая достоверность (доверительная вероятность) и чем меньше число объектов наблюдений.

Так как число испытываемых образцов при определении надежности ограничено, то наименьшее потребное их количество для испытания изоляции можно получить из приведенного выше уравнения, по которому определяли

относительную точность. При числе образцов $N < 30$ это уравнение удобнее записать следующим образом:

$$\frac{t_p}{\sqrt{N}} = \frac{\varepsilon}{S} \quad (4')$$

где S — коэффициент вариации, который вычисляем по формуле

$$S = \frac{\sigma}{U_{cp}} = \frac{4,61}{41,2} = 0,112.$$

В последующих испытаниях на надежность изоляции проводов и мест их электрических соединений доверительную вероятность принимаем равной $p = 0,9$, относительную точность $\varepsilon = 0,05$ и коэффициент вариации $S = 0,15$.

$$\text{Тогда} \quad \frac{\varepsilon}{S} = \frac{0,05}{0,15} = 0,33$$

и по табл. 1 находим [3] наименьшее число образцов, необходимое для одного опыта ($N = 27$).

Используя данные эксперимента и формулу (2) рассчитываем значение надежности изоляции установочных

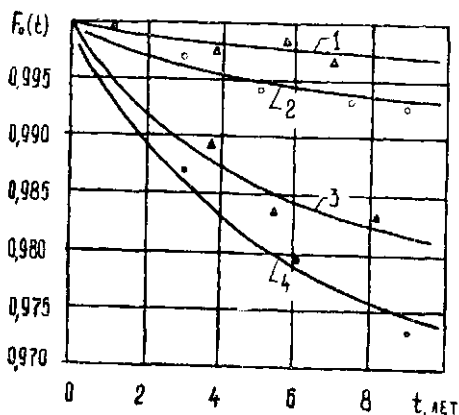


Рис. 2. Зависимость надежности изоляции установочных проводов от длительности эксплуатации:

1 — провода типа АПВ; 2 — провода типа АПР, эксплуатируемые в коровниках; 3 — провода типа АПВ; 4 — провода типа АПР, эксплуатируемые в свинарниках.

проводов типа АПВ и АПР, эксплуатируемых в коровниках и свинарниках. Из рис. 2 видно, что надежность изоляции установочных проводов АПВ и АПР длиной в 1 м за 10 лет эксплуатации в коровниках соответственно снижается до 0,999 и 0,996, а в свинарниках — до 0,982 и 0,973. В свинарниках старение электропроводок происходит более интенсивно, чем в коровниках. В животноводческих помещениях изоляция из поливинилхлорида более надежна, чем резиновая.

При измерении пробивного напряжения изоляции проводов в качестве второго электрода использовали бак с водой, а при испытании изоляции мест соединений — бак с железными опилками.

Надежность электропроводок зависит от конструкции изоляции, уровня технологии ее производства, ремонта и других факторов. Их влияние на надежность может быть косвенно оценено по электрической прочности и ее изменению в процессе эксплуатации и ремонта.

На рис. 3 приведены значения электрической прочности изоляции установочных проводов в зависимости от длительности их эксплуатации в свинарниках. Они

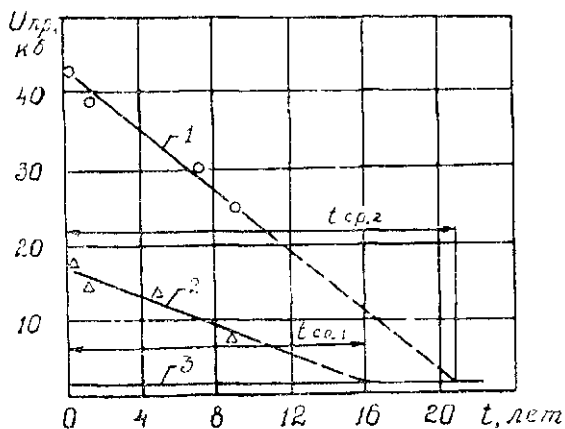


Рис. 3. Зависимость пробивного напряжения изоляции установочных проводов от длительности эксплуатации в свинарниках:

1 — провода типа АПВ; 2 — провода типа АПР;
3 — уровень воздействующих перенапряжений.

свидетельствуют, что электрическая прочность как новой, так и бывшей длительное время в эксплуатации изоляции установочных проводов достаточно высока.

Пробивное напряжение изоляции проводов типа АПВ и АПР после 10 лет эксплуатации соответственно составляет 23 и 7 кВ.

Проведенные исследования электрической прочности изоляции установочных проводов позволяют произвести оценку среднего времени их безотказной работы. Под средним временем безотказной работы изоляции установочных проводов понимается время эксплуатации, в течение которого электрическая прочность изоляции сохраняется выше испытательного напряжения. Величину испытательного напряжения согласно ГОСТ 2990 — 67 определяем в вольтах по формуле

$$U_{исп} = 2U_p + 1000.$$

Уровень воздействующих коммутационных перенапряжений во внутренних электропроводах [4] составляет $(4 \div 5) U_p$.

На рис. 3 приведено среднее время безотказной работы $\tau_{ср}$ изоляции установочных проводов, без учета изоляции мест соединений. Среднее время безотказной работы изоляции равно 14 годам для установочных проводов типа АПР и около 20 лет для АПВ при их эксплуатации в свинарниках.

Сравнительно высокое значение среднего времени безотказной работы установочных проводов указывает на то, что отказы изоляции по причине ее старения существенно не влияют на аварийность и эксплуатационную надежность. Электропроводки снимают с эксплуатации из-за отказов других элементов.

Высокая относительная влажность воздуха в животноводческих помещениях, наличие агрессивных газов, пыли и плесени приводит к увлажнению изоляции и увеличению скорости ее разрушения (старения). Вследствие частичного изменения свойств изоляции, наличия в ней продуктов разложения и воды ее сопротивление уменьшается.

Сконденсировавшаяся на поверхности изоляции вода, отложения пыли, плесень и ее выделения вызывают также значительное увеличение проводимости поверхности

изоляции. Исследования показывают, что при относительной влажности, близкой к 100%, поверхностное сопротивление установочных проводов с хлопчатобумажной защитной оплеткой становится ниже 0,5 Мом уже через 1—2 года эксплуатации. Очистка поверхности проводов с такой оплеткой согласно рекомендациям [5] не дает ожидаемого эффекта. Поэтому применение в животноводческих помещениях проводов с хлопчатобумажной защитной оболочкой типа АИР и АПРТО нежелательно. Более надежными оказываются провода и кабели с оболочкой из поливинилхлорида.

Как указывалось выше, изоляции мест соединений являются наиболее слабым звеном в общей характеристике надежности внутренних электропроводок животноводческих ферм. Вследствие высокой гигроскопичности электроизоляционных лент из прорезиненной хлопчатобумажной ткани ГОСТ 2162-68, сопротивление изоляции мест соединений, выполненных такими изолянтами, через один—два месяца эксплуатации при относительной влажности, близкой к 100%, становится ниже 0,5 Мом. По мере уменьшения влажности в помещении изолянта подсыхает и ее сопротивление опять увеличивается, достигая величин, рекомендуемых ПУЭ. По сравнению с хлопчатобумажными прорезиненными изолянтами применение лентой изолянта из поливинилхлорида несколько увеличивает надежность и долговечность изоляции мест электрических соединений. Однако и такое изолирование не обеспечивает достаточной герметизации соединений.

Уменьшение сопротивления изоляции мест соединений и увеличение поверхностной проводимости проводов вследствие увлажнения и загрязнения поверхности приводит к частым нарушениям ПУЭ, создавая угрозу поражения животных и обслуживающего персонала электрическим током.

Отсюда видна актуальность повышения долговечности, обеспечения равнопрочности и равномерного старения и износа отдельных элементов внутренних электропроводок на животноводческих фермах.

Исследования показывают, что изоляция мест соединений, опрессованных поливинилхлоридным пластиком или лентой электроизоляционной лентой в сочетании с перхлорвиниловыми лаками и добавками ингибиторов, повышает герметизацию, увеличивает надежность и дол-

говечность как изоляции мест соединений, так и изолируемых контактов.

В табл. 2 приведены средние пробивные напряжения и средние квадратические отклонения. Два первых типа изоляции мест электрических соединений выполнены в четыре слоя электроизоляционной прорезиненной лентой типа ПОЛ-20 и липкой поливинилхлоридной лентой типа ПХЛ. Третья группа образцов изготовлена следующим образом. Место электрического соединения и часть основной изоляции проводов каждого образца методом обволакивания покрыли перхлорвиниловым лаком, затем намотали в четыре слоя липкую поливинилхлоридную электроизоляцию типа ПХЛ. Полученные образцы вторично покрыли перхлорвиниловым лаком на длину изолирования.

Таблица 2

Электрическая прочность изоляции мест соединения жил проводов

Тип изоляции	Пробивное напряжение, кВ	Среднее квадратическое отклонение, кВ
I ПОЛ-20	3,86	0,23
ПХЛ	12,2	1,10
ЛАК + ПХЛ + ЛАК	15,5	1,67

При испытании напряжением изоляции мест соединений, выполненных электроизоляционными лентами, было также обнаружено, что места пробоя изоляции распределяются почти на 50% в торце или в начале изолирования скрутки. Применение лака позволяет лучше герметизировать контакты и сделать слой изоляции более равномерным. Распределение мест пробоя изоляции у таких образцов уже подчиняется законам распределения случайных величин.

В ы в о д ы

I. В животноводческих помещениях установочные провода типа АПВ электропроводок с изоляцией из поливинилхлорида могут служить 20 лет и более, а провода типа АПР с резиновой изоляцией около 15 лет. Однако применение установочных проводов типа АПР, защитная оболочка которых выполняется из хлопчатобу-

мажной ткани, нецелесообразно вследствие ее интенсивного старения и уменьшения поверхностного сопротивления изоляции.

2. Основными причинами, вызывающими отказы внутренних электропроводов в животноводческих помещениях, являются низкая надежность и малый срок службы изоляции мест электрических соединений и малый срок службы контактов.

3. Соединения проводов следует изолировать, опрессовывая их поливинилхлоридом. Липкую электроизоляционную ленту из поливинилхлорида следует применять в сочетании с перхлорвиниловыми лаками и ингибиторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М., «Высшая школа», 1970.

2. Венцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969.

3. Пособие для наблюдений числа объектов наблюдений (испытаний). ГОСНИТИ. Методический отдел долговечности. М., 1966.

4. Борисоглебский П. В. и др. Техника высоких напряжений. М., «Энергия», 1964.

5. Инструкция по техническому уходу и текущему ремонту электрооборудования, используемого в сельскохозяйственном производстве МСХ СССР и «Союзсельхозтехника» СМ СССР, от 15 февраля 1968 г.