

сылкой к использованию более мощных энергетических средств.

2. Повышение урожайности и закупочных цен на сельскохозяйственную продукцию является одним из важнейших факторов необходимости применения высокопроизводительных мобильных агрегатов.

Библиографический список

1. Завора В.А. Основы эксплуатации мобильных сельскохозяйственных агрегатов. – Барнаул, 2004. – 256 с.

2. Самсонов В.А., Зангиев А.А., Лачуга Ю.Ф. и др. Основы теории мобильных сельскохозяйственных агрегатов. – М.: Колос, 2000. – 248 с.

3. Пискарев А.В. Надежность технологических систем машиноиспользования в растениеводстве: совершенствование методов проектирования и эксплуатации на основе системного подхода: монография. – Новосибирск: НГАУ, 2011. – 384 с.

4. Плаксин А.М. Энергетика мобильных агрегатов в растениеводстве. – Челябинск, 2005. – 203 с.

5. Завора В.А., Толокольников В.И., Васильев С.Н. Основы технологии и расчета мобильных процессов растениеводства. – Барнаул, 2008. – 263 с.

6. Кушнарёв Л.И. Рациональная организация производственно-технологического сервиса на МТС // Тракторы и с.-х. машины. – 2002. – № 10. – С. 36-42.

7. Плаксин А.М. Методика энергетической оценки машинно-тракторных агрегатов // Вестник ЧГАУ. – Челябинск, 2000. – Т. 31.

8. Пазова Т.Х., Дзуганов В.Б. Обоснование состава парка машин машинно-

технологических станций // Механизация электрификации сельского хозяйства. – 2011. – № 10. – С. 2-3.

References

1. Zavora V.A. Osnovy ekspluatatsii mobil'nykh sel'skokhozyaistvennykh agregatov. – Barnaul, 2004. – 256 s.

2. Samsonov V.A., Zangiev A.A., Lachuga Yu.F. i dr. Osnovy teorii mobil'nykh sel'skokhozyaistvennykh agregatov. – M.: Kolos, 2000. – 248 s.

3. Piskarev A.V. Nadezhnost' tekhnologicheskikh sistem mashinoispol'zovaniya v rastenievodstve: sovershenstvovanie metodov proektirovaniya i ekspluatatsii na osnove sistemnogo podkhoda: monografiya. – Novosibirsk: NGAU, 2011. – 384 s.

4. Plaksin A.M. Energetika mobil'nykh agregatov v rastenievodstve. – Chelyabinsk, 2005. – 203 s.

5. Zavora V.A., Tolokol'nikov V.I., Vasil'ev S.N. Osnovy tekhnologii i rascheta mobil'nykh profsessov rastenievodstva. – Barnaul, 2008. – 263 s.

6. Kushnarev L.I. Ratsional'naya organizatsiya proizvodstvenno-tekhnologicheskogo servisa na MTS // Traktory i s.-kh. mashiny. – 2002. – № 10. – S. 36-42.

7. Plaksin A.M. Metodika energeticheskoi otsenki mashinno-traktornykh agregatov // Vestnik ChGAU. – 2000. – Т. 31.

8. Pazova T.Kh., Dzuganov V.B. Obosnovanie sostava parka mashin mashinno-tekhnologicheskikh stantsii // Mekhanizatsiya elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva. – 2011. – № 10. – S. 2-3.



УДК 534.2.26: 620.22: 677.017

А.Ф. Костюков
A.F. Kostyukov

АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОВОДИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДОК

ANALYSIS OF ACOUSTIC MODEL OF ELECTRICAL WIRING CONDUCTIVITY

Ключевые слова: электропроводка, оценка надежности, акустическая модель, частота колебаний, структура проводника.

Использование технических регламентов не предполагает прогнозирование аварийной ситуации, принятия упреждающих решений по своевременному предотвращению нарушений в сетях сельского электроснабжения. Руководствуясь «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ), «Правилами технической эксплуатации» (ПТЭ) и «Правилами техники безопасности» (ПТБ) электроустановок, невозможно предсказать время

наступления аварийной ситуации в электросетях. Все указанные нормативные акты устанавливают технические требования к выбору, установке, монтажу, наладке, обслуживанию, обнаружению и устранению неисправностей электроустановок и электросетей. Как показал патентно-информационный поиск на глубину 86 лет (с 1928 по 2014 гг.), проведенный автором, в открытой литературе отсутствует информация о разработках по временной оценке надежности электропроводок и электроустановок. Между тем за последние десятилетия энергопотребление производственного, жилого и социально-административ-

ного сектора выросло в разы. По условиям производителей проводов и кабелей гарантированный срок безотказной работы изделий, при условии использования экономических токов, не превышает 20 лет. При нагрузках, близких или равных предельным, срок безотказной работы проводки резко сокращается, из-за быстрого старения, перестройки внутренней структуры проводников (количественного и качественного роста доменных структур), резкого разрушения материала проводников в местах локальных неоднородностей. Вследствие непредсказуемости теплового режима среды прокладки электропроводки рациональным является построение модели, функционирование которой не зависит от вариабельности среды. Таким требованиям могла бы отвечать акустическая модель. Анализ акустической модели показал, что акустические колебания, проходящие по проводнику с током, дают техническую возможность регистрации процессов деградации структуры проводника, но для этого они должны иметь собственную частоту колебаний на порядок выше порядка промышленной частоты электрических колебаний.

Keywords: *electrical wiring, reliability estimation, acoustic model, oscillation frequency, conductor structure.*

The use of technical regulations does not assume forecasting emergency situations or taking well-timed decisions to prevent any disturbance in rural electrical networks. It is impossible to forecast the starting

point of any emergency in electrical networks when following such regulations as 'Electrical Installation Code', 'Operating Instructions' and 'Accident Prevention Regulation'. According to the patent information retrieval for the period of 1928-2014), there is no information on any developments of the time estimation of the reliability of any electricity-generating equipment and electrical networks. However over the past few decades the electric power consumption has grown greatly in the industrial sector, households and social-administrative sector. According to wire and cable manufacturers' specifications, the guarantee period of the failure-free operation of their products does not exceed 20 years. However, under the critical loads or approximately critical loads the period of the failure-free operation of electrical wiring decreases dramatically because of quick aging, rearrangements of the inner structure of the conductors (the growth in quality and amount of the domain configuration), and rapid rupture of conductor material in the points of local non-uniformity. Due to unpredictability of environmental thermal conditions of the wire installation, it is reasonable to develop a model which is independent of environmental changes. An acoustic model could comply with these requirements. The acoustic model analysis has shown that acoustic vibrations passing through the current-carrying conductor give a technical opportunity to record the process of degradation of the conductor structure but to do this they must have their own vibrator frequency, which must be higher than the industrial frequency of electric oscillations.

Костюков Анатолий Федорович, к.т.н., ст. преп., каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-84-49. E-mail: kostjukovaf@mail.ru.

Kostyukov Anatoliy Fedorovich, Cand. Tech. Sci., Asst. Prof., Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-84-49. E-mail: kostjukovaf@mail.ru.

Как известно [1], использование технических регламентов не предполагает прогнозирование аварийной ситуации, принятия упреждающих решений по своевременному предотвращению нарушений в сетях сельского электроснабжения. Руководствуясь «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ), «Правилами технической эксплуатации» (ПТЭ) и «Правилами техники безопасности» (ПТБ) электроустановок, невозможно предсказать время наступления аварийной ситуации в электросетях. Все указанные нормативные акты устанавливают технические требования к выбору, установке, монтажу, наладке, обслуживанию, обнаружению и устранению неисправностей электроустановок и электросетей. Как показал патентно-информационный поиск на глубину 86 лет (с 1928 по 2014 г.), проведенный автором, в открытой литературе отсутствует информация о разработках по временной оценке надежности электропроводок и электроустановок.

Объяснением может быть только то, что до начала Второй мировой войны все элек-

тропроводки имели срок эксплуатации, не превышающий нормативный (25-40 лет), все проводники были из меди высокой чистоты, весь монтаж – открытым (навесным) на фарфоровых изоляторах, нормируемая экономическая плотность тока составляла 2,5-3,0 А/мм², т.е. режим эксплуатации проводок не превышал нормативного [2].

Между тем за последние десятилетия энергопотребление производственного, жилого и социально-административного сектора выросло в разы. В производственной сфере появились значительно более энергонасыщенные технологические машины, аппараты и контрольные приборы, автоматические комплексы различного назначения. Население пользуется не банальными электроплиткой и осветительной лампочкой в 75 В, а люстрами в 200-300 В, мощными холодильниками, стиральными машинами-автоматами, электроплитами с тремя-четырьмя конфорками, водоподогревателями, телевизорами, различной аудио-видеотехникой, компьютерной и множительной техникой [3].

По условиям производителей проводов и кабелей гарантированный срок безотказной работы изделий, при условии использования экономических токов, не превышает 20 лет. Температура проводников при максимальной нагрузке не должна быть выше + 80°C при окружающем фоне +20-25°C [4]. Соответственно, при нагрузках, близких или равных предельным, срок безотказной работы проводки резко сокращается, вследствие быстрого старения, растрескивания изоляции проводов, перестройки внутренней структуры проводников (количественный и качественный рост доменных структур), резкого разрушения материала проводников в местах локальных неоднородностей [5].

Целью исследования является выявление принципиальной возможности оценки степени износа электропроводок и определения времени их эксплуатации до отказа.

Задачами исследования являются:

- определение параметров электропроводок, наиболее выразительно отображающих снижение их эксплуатационных качеств;
- анализ существующих неразрушающих методов контроля применительно к поставленной цели;
- разработка методик технологического контроля состояния электропроводок как в пассивном, так и в рабочем состоянии.

Уже предлагалась модель анализа состояния электропроводок на основе теплотехнического взаимодействия электропроводок и окружающей среды [6], которая справедлива при условии открытой прокладки носителя тока. Однако в случае скрытой проводки указанная модель не учитывает влияние монолитной среды прокладки на тепловой режим носителя тока. Вследствие непредсказуемости теплового режима среды прокладки электропроводки рациональнее было бы построение модели, функционирование которой не зависело бы от варибельности этой среды. Таким требованиям могла бы отвечать акустическая модель. Существует определенная эквивалентность между дифференциальными уравнениями, описывающими механические (акустические) и электромагнитные процессы [7]. Известно, что дифференциальное уравнение сил линейной механической колебательной системы с одной степенью свободы и дифференциальное уравнение вынужденных электрических колебаний в электрическом контуре описываются идентичными выражениями, различающимися только системой обозначения составляющих. Например [8], если механическая система описывается уравнением

$$m \frac{\partial v}{\partial t} + rv + \frac{1}{c} \int v dt = f, \quad (1)$$

где m , r , c – масса, коэффициент трения и гибкость, то электромагнитная система описывается выражением

$$L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = U, \quad (2)$$

где L , R , C – индуктивность, активное сопротивление и емкость.

Исходя из выражений (1) и (2) находим следующие соответствия [9]:

механической массе m – электрическая индуктивность L ,
 коэффициенту трения r – активное сопротивление R ,
 гибкости c – электрическая емкость C ,
 механической скорости v – электрический ток i ,

механической силе f – электрическое напряжение U ,

механическому перемещению x – электрический заряд Q ,

механическому ускорению a – скорость изменения электрического тока $\frac{\partial i}{\partial t}$ и т.д.

Исходя из этого, проанализируем процесс прохождения плоской акустической волны в бесконечном цилиндрическом проводнике (канале)

Для узкого цилиндрического канала (в сравнении с длиной излучаемой волны) уравнение движения запишется как

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial \dot{\xi}}{\partial t} - \mu \left(\frac{\partial^2 \dot{\xi}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{\xi}}{\partial r} \right), \quad (3)$$

где $\frac{\partial p}{\partial x}$ – градиент давления;

ρ_0 – плотность среды распространения;

$\dot{\xi}$ – усредненная по сечению скорость колебания частиц вещества;

μ – коэффициент вязкости;

r – активное сопротивление.

Для синусоидального колебания оно примет вид

$$\frac{\partial^2 \dot{\xi}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{\xi}}{\partial r} + \gamma_r^2 \dot{\xi} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (4)$$

где $\gamma_r = \sqrt{\frac{\omega \rho_0}{\mu} \cdot V - j}$ – постоянная распространения колебаний;

ω – частота.

При граничных условиях

$$\frac{\partial \dot{\xi}(r)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad \dot{\xi}(r) \Big|_{r=a} = 0$$

решение приходит к виду

$$\dot{\xi}(r) = -\frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{j\omega\rho_0} \left[1 - \frac{J_0(\dot{\gamma}r)}{J_0(\dot{\gamma}a)} \right], \quad (5)$$

здесь $J_0(\dot{\gamma}r)$ – функция Бесселя нулевого порядка [7].

Усредняя по всему поперечному сечению проводника колебательную скорость электронов, приходим к выражению [10]

$$\dot{\xi} = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a \dot{\xi}(r) 2\pi r dr = -\frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{j\omega\rho_0} \left[1 - \frac{2}{\dot{\gamma}a} \cdot \frac{J_1(\dot{\gamma}a)}{J_0(\dot{\gamma}a)} \right], \quad (6)$$

вследствие чего удельное акустическое сопротивление цилиндра примет значение

$$\dot{z}_{уд} = \frac{j\omega\rho_0 \cdot J_0(\dot{\gamma}a)}{J_0(\dot{\gamma}a) - 2J_1(\dot{\gamma}a)/\dot{\gamma}a}. \quad (7)$$

При $\dot{\gamma}ra < 1$, т.е. при низкой частоте акустических колебаний, когда длина волны колебаний, по крайней мере, на порядок больше поперечного сечения проводника

$$J_0(\dot{\gamma}a) \approx 1 - \frac{\dot{\gamma}^2 a^2}{4} + \frac{\dot{\gamma}^4 a^4}{64}; \quad J_1(\dot{\gamma}a) \approx \frac{\dot{\gamma}a}{2} \left(1 - \frac{\dot{\gamma}^2 a^2}{8} + \frac{\dot{\gamma}^4 a^4}{192} \right). \quad (8)$$

При высокочастотных зондирующих акустических колебаниях, когда $\dot{\gamma}ra > 10$, из теории функций Бесселя [7] находим, что

$$J_1(\dot{\gamma}a)/J_0(\dot{\gamma}a) = J_1(\dot{\gamma}a\sqrt{-j})/J_0(\dot{\gamma}a\sqrt{-j}) = -j. \quad (9)$$

Подставив (9) в (7), получим

$$\dot{z}_{уд} = \sqrt{2\omega\rho_0\mu}/a + j(\omega\rho_0 + \sqrt{2\omega\rho_0\mu}/a). \quad (10)$$

Активная составляющая сопротивления выражается формулой Гельмгольца $r_{уд} = \sqrt{2\omega\rho_0\mu}/a$.

Исходя из вышеизложенного, уравнение движения колебаний в звукопроводе (электропроводе) примет вид

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \dot{z}_{уд} \dot{\xi} = r_{уд} \dot{\xi} + j\omega\rho_{эф} \dot{\xi}, \quad (11)$$

где $\dot{\xi}$ – усредненная по сечению провода колебательная скорость.

Считая для синусоидальных колебаний $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$, получим

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = r_{уд} \dot{\xi} + \rho_{эф} \frac{\partial \dot{\xi}}{\partial t}. \quad (12)$$

Тогда уравнение непрерывности запишется в виде

$$-\frac{\partial p}{\partial t} = E \frac{\partial \dot{\xi}}{\partial x}. \quad (13)$$

Дифференцируя (12) по t , а (13) по x , приравняв их правые части, получим

$$\rho_{эф} \frac{\partial^2 \dot{\xi}}{\partial t^2} + r_{уд} \frac{\partial \dot{\xi}}{\partial t} = E \frac{\partial^2 \dot{\xi}}{\partial x^2} \quad (14)$$

или после деления на $\rho_{эф}$

$$\frac{\partial^2 \dot{\xi}}{\partial t^2} + \frac{r_{уд}}{\rho_{эф}} \frac{\partial \dot{\xi}}{\partial t} = c_0'^2 \frac{\partial^2 \dot{\xi}}{\partial x^2}, \quad (15)$$

где $c_0' = \sqrt{E/\rho_{эф}} = \sqrt{\frac{E}{\rho_0} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_{эф}}} = c_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{эф}}}$ (16)

$$\frac{\partial}{\partial t} = j\omega \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2}{\partial t^2} = (j\omega)^2$$

Поскольку

$$\frac{d^2 \dot{\xi}}{dx^2} - \dot{\gamma}^2 \dot{\xi} = 0 \quad \text{при} \quad (17)$$

$$\dot{\gamma} = j \frac{\omega}{c_0} \sqrt{1 - j \frac{r_{уд}}{\omega\rho_{эф}}}$$

Принимая во внимание только прямую волну (бегущую, без отражения), уравнение (17) запишется в следующем виде

$$\dot{\xi} = A e^{-\dot{\gamma}x} = A e^{-hx} \cdot e^{-j kx}, \quad (18)$$

где h – коэффициент ослабления;

k – волновое число.

Уравнение (18) описывает затухающую акустическую волну, определяемую путем распространения x_0 , выраженным через длину волны λ , в пределах которой она ослабляется по амплитуде в e раз. В случае, когда h и k , вещественная и мнимая посто-

янной распространения $\dot{\gamma}$, имеют значение $\dot{\gamma}_y d \ll 1$, т.е. когда длина волны, проходящей через проводник, акустических колебаний больше, чем диаметр проводника, или

$$\dot{\gamma}_y d = \sqrt{\frac{\omega\rho_0}{\mu}} d \ll 1$$

иначе, и активное сопротивление $r_{уд}$ существенно превышает $\omega\rho_{эф}$, то

$$\dot{\gamma} \approx j \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\frac{(-j)r_{уд}}{\omega\rho_{эф}}} \quad (19)$$

а так как $c_0' = c_0 \sqrt{\rho_0/\rho_{эф}}$ и $j\sqrt{-j} = j(1-j)/\sqrt{2}$, то, соответственно,

$$\dot{\gamma} = \frac{\sqrt{6}}{\dot{\gamma}_y d} \cdot \frac{\omega}{c_0} (1+j) \quad \text{и} \quad (20)$$

$$h = k = \frac{\omega}{c_0} \frac{\sqrt{6}}{\dot{\gamma}_y d}. \quad (21)$$

Отсюда следует, что

$$x_0 = \frac{1}{h} = \frac{\gamma_y d}{2\sqrt{6}\pi} \lambda \quad (22)$$

Иначе говоря $x_0 \ll \lambda$, т.е. ослабление амплитуды колебаний в e раз происходит на интервале много меньшем, чем длина волны акустического колебания [10].

При $\gamma_y d \geq 10$ и $r_{уд} \ll \omega \rho_{эф}$, $\rho_{эф} \approx \rho_0$, $c'_0 \approx c_0$

$$\gamma \approx \frac{r_{уд}}{2\rho_0 c_0} + j \frac{\omega}{c_0}; \quad h = \frac{r_{уд}}{2\rho_0 c_0}; \quad k = \frac{\omega}{c_0}$$

получим, что

$$h = \frac{1}{2\rho_0 c_0} \cdot \frac{\sqrt{2\omega\rho_0\mu}}{d} = \frac{\omega}{c_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}\gamma_y d} \quad (23)$$

и, соответственно, $x_0 = \frac{1}{h} = \gamma_y d \lambda / \pi \sqrt{2}$ (24)

Иначе говоря, при $\gamma_y d \geq 10$, ослабление акустического сигнала в e раз происходит на расстоянии более, чем на порядок, превышающий длину акустической волны λ [10].

Выводы

1. За последние десятилетия энергопотребление производственного, жилого и социально-административного сектора выросло в разы.

2. При нагрузках, близких или равных предельным, срок безотказной работы проводки резко сокращается.

3. Работ, посвященных оценке состояния электропроводок, находящихся в эксплуатации более 20 лет, практически нет.

4. Использование технических регламентов ПУЭ, ПТЭ и ПТБ не предполагает прогнозирование аварийной ситуации, принятия упреждающих решений по своевременному предотвращению нарушений в сетях производственного и бытового сельского электроснабжения.

5. Анализ акустической модели показал, что низкочастотные акустические колебания, проходящие по проводнику с током, должны иметь собственную частоту колебаний на порядок выше порядка промышленной частоты электрических колебаний.

Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ-7). – М.: Энергия, 2007. – 704 с.

2. Цигельман И.Е. Электроснабжение гражданских зданий и коммунальных предприятий. – М.: Высшая школа, 1977. – 392 с.

3. Электрические сети жилых зданий / Г.В. Мирер, И.К. Тульчин, Г.С. Гринберг и др. – М.: Энергия, 1974. – 264 с.

4. Правила оценки физического износа жилых зданий. ВСН 53-86.

5. Novak J.F. Performance of Enclosures for Low-Resonance, High-Compliance Loudspeakers // IRE Transactions on Audio. – 1959. – AU-7. – P. 5-13.

6. Костюков А.Ф. Анализ состояния электропроводок на основе теплотехнической модели // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 2. – С. 106-112.

7. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. – М.: Наука, 1977.

8. Стретт В. (лорд Рэлей). Теория звука. – М.: Гостехиздат, 1955. – 476 с.

9. Римский-Корсаков А.В. Электроакустика. – М.: Связь, 1973. – 272 с.

10. Вахитов Я.Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура. – М.: Искусство, 1982. – 415 с.

References

1. Pravila ustroistva elektroustanovok (PUE-7). – M.: Energiya, 2007. – 704 s.

2. Tsigel'man I.E. Elektrosnabzhenie grazhdanskikh zdaniy i kommunal'nykh predpriyatii. – M.: Vysshaya shkola, 1977. – 392 s.

3. Elektricheskie seti zhilykh zdaniy / G.V. Mirer, I.K. Tul'chin, G.S. Grinberg i dr. – M.: Energiya, 1974. – 264 s.

4. Pravila otsenki fizicheskogo iznosa zhilykh zdaniy. VSN 53-86.

5. Novak J.F. Performance of Enclosures for Low-Resonance, High-Compliance Loudspeakers // IRE Transactions on Audio. – 1959. – AU-7. – P. 5-13.

6. Kostyukov A.F. Analiz sostoyaniya elektroprovodok na osnove teplotekhnicheskoi modeli // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – № 2. – S. 106-112.

7. Yanke E., Emde F., Lesh F. Spetsial'nye funktsii. – M.: Nauka, 1977.

8. Strett V. (lord Relei). Teoriya zvuka. – M.: Gostekhizdat, 1955. – 476 s.

9. Rimskii-Korsakov A.V. Elektroakustika. – M.: Svyaz', 1973. – 272 s.

10. Vakhitov Ya.Sh. Teoreticheskie osnovy elektroakustiki i elektroakusticheskaya apparatura. – M.: Iskusstvo, 1982. – 415 s.

