

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИРУЮЩЕГО ПАРАМЕТРА ПРИ СТРАТЕГИИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО СОСТОЯНИЮ

Н.Н. Сырых, А.И. Некрасов, А.А. Некрасов

Дано обоснование применения радиального зазора подшипникового узла электродвигателя в качестве диагностирующего параметра при реализации стратегии обслуживания электрооборудования по состоянию. При определении предотказового состояния использован принцип назначения упреждающего допуска, расположенного между предельным и предотказовым значениями диагностирующего параметра.

Установлено, что значение упреждающего допуска зависит от периодичности контроля диагностирующего параметра, а момент первой проверки определяется из условий заданной вероятности безотказной работы электродвигателя. При обслуживании по состоянию значительно увеличивается использование ресурса электродвигателей, задействованных на ответственных технологических процессах сельскохозяйственного производства.

Ключевые слова: система эксплуатации электрооборудования, техническое обслуживание и ремонт, электродвигатель, диагностирующий параметр, подшипниковый узел, радиальный зазор, упреждающий допуск, периодичность обслуживания.

Подшипниковый узел асинхронного электродвигателя наряду с обмоткой статора также является одной из главных составных частей, существенно влияющих на его надежность. При этом совершенствование изоляционных свойств обмоток электродвигателей и их защит от аварийных режимов приводит к повышению составляющей отказов по причине износа подшипниковых узлов до 10-15%.

На надежность подшипниковых узлов оказывают влияние многочисленные факторы, среди которых: характер среды сельскохозяйственных помещений (запыленность, загазованность, повышенная влажность), режимы работы (временные, пусковые, нагрузочные и др.), качество монтажных работ при соединении с рабочей машиной (несоосность валов, слабые фундаменты, вибрация), низкое качество подводимой электроэнергии (несимметрия и др.), механический износ и др. Важной особенностью эксплуатации электродвигателей в сельскохозяйственном производстве является наличие практически одновременного действия этих факторов на подшипниковые узлы.

Одним из основных параметров, характеризующих техническое состояние подшипникового узла, является величина радиального зазора подшипника. При превышении радиального зазора выше допустимого (конструктивный параметр) происходит выход из строя электродвигателя. При этом изменение

величины радиального зазора при работе электродвигателя удовлетворяет требованиям к диагностическим параметрам, изложенным в [1] и возможно его использование при применении стратегии обслуживания по состоянию.

В [2] получена обобщенная математическая модель (при $\eta(t) = \delta(t)$), устанавливающая для монотонного случайного процесса $\delta(t)$, описывающего изменение во времени радиального зазора подшипникового узла с известным заданным моментом проведения первой проверки устройства t_1 и предельным значением параметра δ^{**} , связь очередного (второго) срока диагностирования t_2 и наименьшего предотказового значения параметра δ^* .

Из полученной математической модели следует, что

$$\delta^* = \frac{\delta^{**}(\sigma_a + \sigma_\epsilon \cdot t_1) - (m_\epsilon \sigma_a - m_a \sigma_\epsilon) \cdot \tau}{\sigma_a + \sigma_\epsilon t_1 + \sigma_\epsilon \tau}; \quad (1)$$

$$\Delta \delta = \delta^{**} - \delta^* = \frac{[(\delta^{**} - m_a) \sigma_\epsilon + m_\epsilon \cdot \sigma_a] \tau}{\sigma_a + \sigma_\epsilon t_1 + \sigma_\epsilon \tau} \quad (2)$$

Параметр δ^* является наименьшим предотказовым значением радиального зазора, выход которого за предельный уровень означает наличие существенных поврежде-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №2/2 2011

**МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИРУЮЩЕГО ПАРАМЕТРА ПРИ СТРАТЕГИИ
ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО СОСТОЯНИЮ**

ний и служит сигналом для планирования мероприятий по его замене.

Для выявления предотказового состояния подшипников используется принцип назначения упреждающих допусков на диагностические параметры. При этом под упреждающим допуском $\Delta\delta$ понимается совокупность значений параметров, заключенных между предельными δ^{**} и предотказовым δ^* значениями параметра $\Delta\delta = \delta^{**} - \delta^*$. Выход параметра за предельный уровень δ^{**} означает отказ. Величина упреждающего допуска создает запас работоспособности изделия, обеспечивающий при периодическом контроле с профилактическими (восстановительными) работами безотказную работу до очередной проверки.

В приведенных формулах параметры m_a, m_σ, σ_a , и σ_σ являются коэффициентами линейной аппроксимации математического ожидания $m_\delta(t) = m_a + m_\sigma t$ и среднего квадратического отклонения $\sigma_\delta(t) = \sigma_a + \sigma_\sigma t$ для нормального закона изменения параметра с плотностью распределения:

$$f(\delta, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_\delta(t)} \cdot e^{-\frac{(\delta - m_\delta(t))^2}{2(\sigma_\delta(t))^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} (\sigma_a + \sigma_\sigma t)} \cdot e^{-\frac{(\delta - m_a - m_\sigma t)^2}{2(\sigma_a + \sigma_\sigma t)^2}} \quad (3)$$

Для проведения расчетов по выражению (3) использованы таблицы функции Лапласа для нормального закона распределения нормированной случайной величины [3].

Функция $F(x)$ случайной величины x с параметрами m_x и δ_x выражается через функцию распределения $\Phi(U)$ случайной величины U с параметрами $m_x = 0$ и $\delta_x = 1$. [3]:

$$F(x) = \Phi(U) = \Phi\left(\frac{x - m_x}{\delta_x}\right).$$

Выражение для определения вероятности безотказной работы в этом случае принимает вид:

$$\bar{F}(\delta, t) = \Phi\left(\frac{\delta - m_a - m_\sigma t}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\sigma^2 \cdot t^2}}\right). \quad (4)$$

Из уравнения (2) следует, что при прочих равных условиях значение упреждающего допуска зависит от периодичности контро-

ля параметров $\tau = t_2 - t_1$: чем больше время наработки объекта между очередными проверками, тем больше должна быть и величина упреждающего допуска. Кроме того упреждающий допуск связан с периодичностью контроля таким образом, чтобы при наработке t , находящейся в пределах $t_{i+1} \leq \tau \leq t_i$, параметр δ после пересечения δ^* до момента контроля t_{i+1} не пересек границу δ^{**} с вероятностью, представляющей собой заданный уровень безотказной работы за наработку $\Delta t = \tau$.

Из этого следует, что момент первой проверки t_1 должен определяться из условия заданного уровня безотказной работы $\bar{F}(t_1)$:

$$t_1 = \frac{\delta^{**} - m_a - U_{1-\varepsilon} \cdot \sigma_a}{m_\sigma + U_{1-\varepsilon} \cdot \sigma_\sigma}, \quad (5)$$

где $U_{1-\varepsilon}$ - квантиль нормального распределения, соответствующая вероятности $\bar{F}(t_1)$.

Результаты расчета момента первой проверки t по выражению (5) для различных значений средней наработки T за срок службы электродвигателя при $U_{1-\varepsilon} = 2,9$ приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты расчета момента первой проверки, t_1 ($U_{1-\varepsilon} = 2,9$)

Общая наработка T_0 , час/мес	m_σ , мм/мес.	σ_σ , мм/мес.	t_1 , мес.
16000 / 22,22	0,0038	0,00128	11,32
15000 / 20,83	0,0041	0,00137	10,53
14000 / 19,44	0,0044	0,00146	9,84
13000 / 18,06	0,0047	0,00157	9,19
12500 / 17,36	0,0049	0,00163	8,83
12000 / 16,67	0,0051	0,00170	8,47
11500 / 15,97	0,0053	0,00177	8,15
11000 / 15,28	0,0057	0,00185	7,68
10500 / 14,58	0,0058	0,00194	7,44
10000 / 13,89	0,0061	0,00204	7,07
9500 / 13,19	0,0064	0,00215	6,72
9000 / 12,50	0,0068	0,00227	6,35

Из формулы (5) и таблицы 1 следует, что момент первой проверки для конкретного изделия при прочих равных условиях непосредственно зависит от принимаемой веро-

ятности безотказной работы $\bar{F}(t_1)$. При выборе величины этого параметра необходимо руководствоваться следующими соображениями.

Распределение параметра для нового изделия (при $t \neq 0$) практически находится в области значений достаточно удаленных от границы области упреждающих допусков. При этом заданная допустимая вероятность отказа должна быть максимальной, что соответствует максимальному значению вероятности безотказной работы за время t_1 (близкой к единице) и квантили $U_{1-\varepsilon}$ (близкой к трем).

Кроме того, очередные проверки (например, в момент времени t_2) выполняются на подшипниках, распределение параметров которых уже отличаются от таковых для новых изделий. Поэтому дальнейшую периодичность контроля с профилактическими восстановлениями параметра целесообразно выполнять за время $t_2 < t_1$, которое следует округлять до ближайшего меньшего установленного стандартного значения, например, найденного по экономическим соображениям или рекомендуемого системой ППРЭсх [4].

Следует также учитывать наличие у электродвигателя более одного определяющего надежность параметра, например двух, с различными моментами первых проверок t_1' и t_1'' , вычисленных по формуле (5). В этом случае за момент первой проверки следует принимать наименьший из них.

При принятии допустимой вероятности отказа подшипника до момента времени t_2 , с учетом периодичности проверок τ , следует иметь в виду, что вероятность безотказной работы для момента времени $t_2 = t_1 + \tau_1$ должна быть также достаточна для его практического использования в работе (например, не менее 0,90 - 0,95).

В рассматриваемой обобщенной модели начальное значение зазора подшипника является случайной величиной, что неизбежно требует привлечения дополнительной исходной информации. Поэтому ограничимся наиболее часто встречающимся на практике случаем детерминированного значения начального параметра δ_0 , при котором $\sigma_a = 0$. В этом случае формулы (1) и (4) принимают вид:

$$\delta^* = \frac{\delta^{**} \cdot t_1 + m_a \cdot \tau}{t_1 + \tau}; \quad (6)$$

$$\bar{F}(\delta, t) = \Phi\left(\frac{\delta - m_a - m_\sigma t}{\sigma_\sigma t}\right). \quad (7)$$

Рассмотрим применение полученной математической модели к определению параметров стратегии обслуживания по состоянию с использованием характеристик надежности подшипникового узла асинхронного двигателя 4А160, 3000 об/мин., 15 кВт, подшипник № 310.

В соответствии с [5,6] подшипники качества имеют нормированные зазоры: номинальный (начальный) в среднем $\delta_n = 0,015$ мм, и предельно допустимый $\delta_{np} = 0,1$ мм, которые определяет срок службы \bar{T} двигателя на данном технологическом процессе.

Принимаем расчетный срок службы асинхронного двигателя по наработке $T = 12000$ ч или 16,7 мес. (среднее значение), скорость изнашивания подшипника происходит по нормальному закону с параметрами:

$$m_a = 0,015 \text{ мм,}$$

$$\sigma_a = \frac{0,015}{3} = 0,005 \text{ мм,}$$

$$\sigma_\sigma = \frac{0,00509}{3} = 0,00170 \text{ мм/мес.}$$

$$m_\sigma = \frac{\delta_{np} - \delta_n}{\bar{T}} = \frac{0,1 - 0,015}{12000} = \frac{0,085}{16,7} = 0,00509 \text{ мм/мес.}$$

Среднеквадратическое отклонение скорости изнашивания подшипника σ_σ определено (пессимистическая оценка) из правил "трех сигм" для нормального закона.

Исходя из изложенных выше условий примем $\bar{F}(t_1) = 0,998$, $U_{1-\varepsilon} = 2,9$. Подставляя принятые значения в формулу (5) получим:

$$t_1 = \frac{0,1 - 0,015}{0,00509 + 2,9 \cdot 0,00170} = 8,48 \text{ мес.}$$

Округляя до стандартных периодичностей в сторону уменьшения, получим $t_1 = 6$ мес.

Наименьшее предотказовое значение параметра δ^* в соответствии с формулой (6) будет:

$$\delta^* = \frac{0,00102 + 0,0000255\tau}{0,0102 + 0,0017\tau}. \quad (8)$$

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИРУЮЩЕГО ПАРАМЕТРА ПРИ СТРАТЕГИИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО СОСТОЯНИЮ

Определим вероятность отказа подшипника и его вероятность безотказной работы за время $t_2 = t_1 + \tau$, используя формулу (7):

$$\begin{aligned}
 F(t_2) &= P\{\delta^{**} < \delta < \infty\} = \\
 &= \Phi\left(\frac{\infty - 0,015 - 0,00509t_2}{0,0017 \cdot t_2}\right) - \\
 &- \Phi\left(\frac{0,1 - 0,015 - 0,00509t_2}{0,0017t_2}\right) \\
 F(t_2) &= 1 - \Phi\left(\frac{0,085 - 0,00509t_2}{0,0017t_2}\right). \quad (9)
 \end{aligned}$$

Вычисленные по формуле (8) предотказовые значения параметра δ^* при различных периодичностях τ контроля параметра, а также вычисленные по формуле (9) вероятности отказа для различных значений t_2 приведены в табл. 2. Здесь же приведены величины упреждающих допусков $\Delta\delta$, вероятности безотказной работы $\bar{F}(t_2)$ и вероятности отказа $F(t_2)$.

Таблица 2- Параметры обслуживания подшипникового узла электродвигателя по состоянию

τ мес.	t_2 мес.	δ^* мм	$\Delta\delta$ мм
0	6	0,10	0
2	8	0,079	0,021
4	10	0,066	0,034
6	12	0,0575	0,0425
8	14	0,0514	0,0482
10	16	0,0469	0,0531

продолжение таблицы 2

$F(t_2)$	$\bar{F}(t_2)$	Примечание
0	1,0	$\delta^{**} = 0,1$ $\bar{F}(t_1) = 0,998$ $t_1 = 6 \text{ мес.}$ $T = 16,7 \text{ мес.}$
0,0006	0,9994	
0,0223	0,9777	
0,121	0,879	
0,282	0,718	
0,448	0,552	

На рисунок 1 приведены зависимости предотказового параметра δ^* и упреждающего допуска $\Delta\delta$ от периодичности проверок τ .

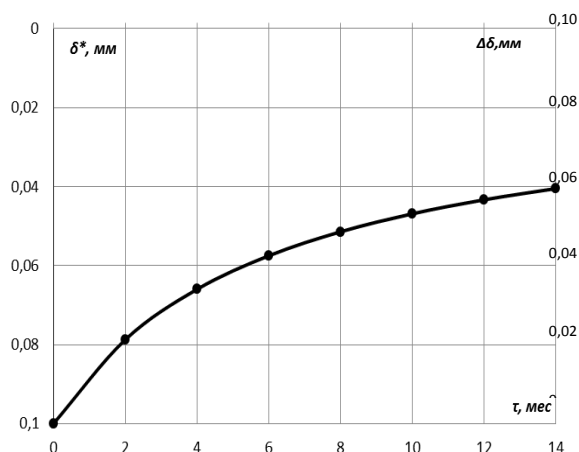


Рисунок 1 – Совмещенные зависимости радиального зазора предотказного параметра δ^* и упреждающего допуска $\Delta\delta$ от периодичности проверок τ .

На рисунке 2 приведены зависимости вероятности безотказной работы $\bar{F}(t_2)$ и вероятности отказа $F(t_2)$ от момента времени t_2 .

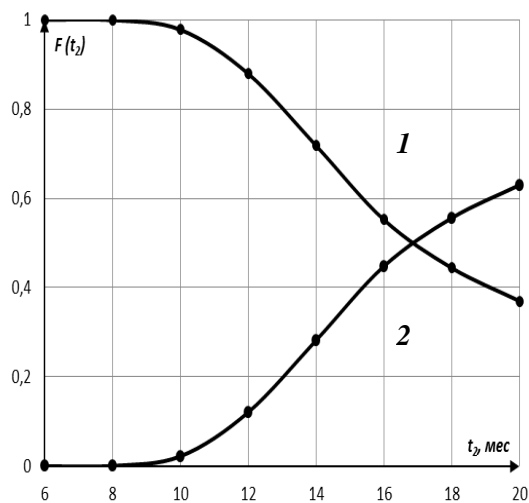


Рисунок 2 – Зависимость вероятности безотказной работы $\bar{F}(t_2)$ (кривая 1) и вероятности отказа $F(t_2)$ (кривая 2) от времени проведения проверок $t_2 = t_1 + \tau$

Построенные зависимости позволяют определять основные параметры стратегии обслуживания по состоянию при различной периодичности τ проведения профилактического контроля подшипникового узла электродвигателя и заданного времени первого профилактического контроля t_1 , исходя из максимально допустимой вероятности отказа.

Например, при $t_1 = 6$ мес. и периодичности проверок $\tau = 6$ мес. по наработке, время проведения второй проверки должно осуществляться при $t_2 = 12$ мес. При такой периодичности τ предотказовое состояние подшипникового узла электродвигателя достигает при $\delta^* = 0,058$ мм радиального зазора, а значение упреждающего допуска - $\Delta\delta = 0,042$ мм, при вероятности отказа $F(12) = 0,121$.

Оценим эффективность применения стратегии обслуживания электродвигателя по состоянию в сравнении с планово-предупредительной стратегией его обслуживания по календарной наработке, с точки зрения увеличения использования ресурса.

В соответствии с полученными данными при обслуживании по состоянию ресурс электродвигателя до его профилактической замены составляет 12 мес. при вероятности отказа 0,121 и периодичности проверок 6 мес.

При планово-предупредительной стратегии обслуживания по наработке вероятность отказа двигателя со средним сроком службы $\bar{T} = 16,7$ мес. и средним квадратическим

отклонением $\sigma = \frac{16,7}{3} = 5,57$ мес. определяется по формуле

$$F(t) = \Phi\left(\frac{t - \bar{T}}{\sigma}\right).$$

Расчеты показывают, что вероятность отказа $F(t) = 0,121$ возникает в данном случае при $t = 9,9$ мес., т.е. на 2,1 мес. раньше. Это говорит о том, что при обслуживании по состоянию расчетное значение использования ресурса электродвигателя увеличивается на 21,2 %.

Если при обслуживании по состоянию периодичность проверок осуществлять при $\tau = 6$ мес. через 5 мес., то ресурс электродвигателя до его профилактической замены составляет 11 мес. При этом соответствующие параметры принимают значения $\delta^* = 0,0614$ мм, $\Delta\delta = 0,0386$ мм, а вероятность отказа $F(t) = 0,061$ возникает в данном случае при $t = 8$ мес. т.е. на 3 мес. раньше, а использование ресурса электродвигателя увеличивается на 37,5 %.

При использовании радиального зазора подшипников в качестве прогнозирующего параметра наибольшие трудности возникают

при осуществлении контроля величины радиального зазора подшипников в условиях эксплуатации без демонтажа и разборки электродвигателя. Для осуществления мгновенной оценки технического состояния подшипников в работающих электродвигателях предназначен прибор ФВД АЛ-2-4 МТ. Щуп (магнитный датчик) устанавливается непосредственно на корпус электродвигателя и мгновенно считывается результат, отображаемый на оцифрованном от 0 до 25 стрелочном индикаторе, а также может быть подтвержден прослушиванием через головные телефоны в режиме «НЧ».

Известен способ определения радиальных зазоров подшипников без разборки электродвигателей, основанный на использовании участков статора с обмоткой в качестве электромагнита, притягивающего ротор в определенных направлениях при подаче на них напряжения. Перемещение вала ротора будет соответствовать зазору всего подшипникового узла [5].

Следует также отметить, что технология текущего ремонта предусматривает разборку электродвигателя, поэтому в этом случае измерение зазора можно выполнить с использованием различных специальных приспособлений без съема подшипника с вала, например, КИ – 6178.

Что касается других параметров модели, то их можно получить из справочных данных для каждого типа подшипников, применяемых на соответствующем типоразмере электродвигателя и статистических данных о выходе из строя электродвигателей по причине отказов подшипников, применительно к условиям окружающей среды и режимам работы [5,6].

При проведении безразборных диагностических проверок или текущих ремонтов, предусматривающих частичную разборку электродвигателей необходимо осуществлять запись в журнал даты проверки текущего значения радиального зазора подшипникового узла, величины износа и скорости износа подшипника.

Выводы

1. При реализации стратегии обслуживания электрооборудования по состоянию необходимо обоснование и выбор определяющего (диагностирующего) параметра, адекватно и однозначно характеризующего техническое состояние рассматриваемого изделия. В рассматриваемом примере в качестве такого параметра использован ради-

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИРУЮЩЕГО ПАРАМЕТРА ПРИ СТРАТЕГИИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО СОСТОЯНИЮ

альный зазор подшипника асинхронного электродвигателя.

2. В соответствии с полученной математической моделью для выявления (определения) предотказового состояния использован принцип назначения упреждающего допуска $\Delta\delta$, расположенного между предельным δ^{**} и предотказовым δ^* значениями $\Delta\delta = \delta^{**} - \delta^*$ диагностирующего параметра.

3. Значение упреждающего допуска зависит от периодичности контроля диагностирующего параметра $\tau = t_2 - t_1$. Момент первой проверки t_1 определяется из условий заданной вероятности безотказной работы $\bar{F}(t_1)$ изделия. Моменты последующих проверок с профилактическими восстановлениями основного параметра следует выполнять за время $t_2 < t_1$.

4. Рассматриваемая методика проиллюстрирована примером реализации стратегии обслуживания по состоянию и использованием характеристик надежности подшипникового узла асинхронного электродвигателя 4А160. Построены зависимости предотказового состояния δ^* и упреждающего допуска от времени работы при периодичности проверок $\tau = 6$ мес и моменте первой проверки 6 мес. Установлено, что при обслуживании по состоянию расчетное значение использования ресурса электродвигателя увеличивается на 21,2 %.

5. Применение стратегии обслуживания электрооборудования по состоянию в первую очередь является эффективным при эксплуатации мощных дорогостоящих электродвигателей, задействованных на ответственных технологических процессах сельскохозяйственного производства, не допускающих дли-

тельных простоев и связанных с большими материальными ущербами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герцбах, И.Б. Модели профилактики. – М., Советское радио, 1959. – 215 с.

2. Сырых Н.Н., Некрасов А.А. Математическая модель обоснования стратегии обслуживания электрооборудования / Н.Н. Сырых, А.А. Некрасов / Техника в сельском хозяйстве, №3, 2009. – С.17-19.

3. Сырых, Н.Н. Теоретические основы эксплуатации электрооборудования/ Н.Н. Сырых, Н.Е. Кабдин – М.: Агробизнесцентр, 2007. – 514 с.

4. Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования сельскохозяйственных предприятий / Система ППРЭСХ/. - М.: ВО Агропромиздат, 1987. – 191 с.

5. Таран, В.П., Андриец В.К., Синельник А.В. Справочник по эксплуатации электроустановок/ В.П. Таран, В.К. Андриец, А.В. Синельник. - М.: Колос, 1983. – 22 с.

6. Сырых, Н.Н., Калмыков С.А. Техническое обслуживание и ремонт электрооборудования в сельскохозяйственном производстве/ Н.Н. Сырых, С.А. Калмыков– М.: Росагропромиздат, 1992. – 128 с.

Сырых Н.Н., д.т.н., главный научный сотрудник, Государственное Научное Учреждения Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ), тел.: 8(499)171-85-40, E-mail: viesh@dol.ru;

Некрасов А.И., д.т.н., старший научный сотрудник, Государственное Научное Учреждения Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ), тел.: 8(499)171-85-40, E-mail: viesh@dol.ru;

Некрасов А.А., научный сотрудник, Государственное Научное Учреждения Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ), тел.: 8(499)171-85-40, E-mail: viesh@dol.ru.