

УДК 621.316:631.371

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

Докт. техн. наук, проф. РУСАН В. И., инж. ПУХАЛЬСКАЯ О. Ю.

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого*

Под надежностью электроснабжения понимается свойство системы электроснабжения обеспечивать потребителей электроэнергией в требуемом объеме и заданного качества. К сожалению, к настоящему времени проблема обеспечения надежного электроснабжения потребителей сельскохозяйственного назначения по-прежнему остается актуальной. В ре-

зультате комплексной электрификации сельскохозяйственного производства изменилась технология производственного процесса, и внезапное нарушение электроснабжения наносит значительный материальный ущерб предприятиям агропромышленного комплекса (АПК).

В статье по разработанной авторами методике выполнен расчет основных показателей надежности для существующих схем электроснабжения потребителей АПК Гомельского РЭС, предложены мероприятия по повышению надежности, рассчитано изменение показателей надежности и снижение ущерба от недоотпуска электроэнергии при перерывах электроснабжения в случае внедрения этих мероприятий.

Исходные данные для расчета показателей надежности электроснабжения потребителей АПК. Согласно [1] установлены следующие нормативные показатели надежности электроснабжения потребителей:

- 1) количество внезапных отключений потребителя (частота отказов), шт./год;
- 2) средняя продолжительность одного отключения (длительность перерыва), ч.

В качестве исходных данных для расчета этих показателей была собрана следующая информация:

- 1) сведения о подстанции (ПС) 110(35)/10 кВ – высшее напряжение ПС, кВ; число трансформаторов на ПС 110(35)/10 кВ, шт.; число линий электропередачи (ЛЭП) 110(35) кВ, присоединенных к шинам ПС 110(35)/10 кВ; наличие автоматического ввода резерва (АВР) и секционного выключателя на стороне 110(35) кВ; наличие АВР на стороне 10 кВ; число выключателей 10 кВ на ПС 110(35)/10 кВ, шт.; наличие дежурного или телеуправления на ПС, расстояния между подстанциями от базы оперативно-выездной бригады (ОВБ) до подстанций;

- 2) сведения о воздушных линиях (ВЛ) 10 кВ – схемы ВЛ 10 кВ с указанием длины участков, марки и сечения проводов, трансформаторных подстанций (ТП) с диспетчерскими номерами и установленной мощностью, коммутационные аппараты (разъединители, выключатели нагрузки, выключатели) с диспетчерскими номерами, нормальные разрывы; паспортные данные ВЛ 10 кВ – сведения о количестве элементов различных видов на линии;

- 3) сведения о потребителях – электрическая цепь «источник питания – потребитель»; наименование населенного пункта, в котором расположен потребитель; категория потребителя по надежности; расстояние от питающей ПС 110(35)/10 кВ до ТП потребителя, км; наличие АВР на стороне 10 и 0,4 кВ в ТП; количество линейных аппаратов 0,38 кВ в ТП, шт.; расстояние по дорогам от базы ОВБ до ТП, км; сведения о ВЛ 0,38 кВ.

Расчет количества внезапных отключений потребителей сельскохозяйственного назначения. Электрическая цепь «источник питания – потребитель» (рис. 1) состоит из следующих элементов: ЛЭП 110(35) кВ; ПС 110(35)/10 кВ; ВЛ 10 кВ; ТП 10/0,4 кВ и ВЛ 0,38 кВ.



Рис. 1. Элементы цепи «источник питания – потребитель»

Вероятное расчетное количество отказов электроснабжения потребителя АПК определяется числом отключений элементов по всей цепи «источник питания – потребитель» с учетом наличия устройств противоаварийной автоматики. Началом цепи принимаются шины 110 кВ ПС 110–330 кВ или электростанции, а последним элементом – конец его питающей линии на зажимах вводного устройства потребителя. Расчет количества отключений каждого элемента цепи основан на учете их удельной повреждаемости, тогда количество повреждений, возникающих в этой цепи за год:

$$M = \sum \omega_i n_i, \quad (1)$$

где ω_i – параметр потока отказов (ППО) i -го элемента, промилле; n_i – количество элементов i -го вида в цепи «источник – потребитель».

При расчетах надежности электроснабжения конкретного потребителя информацию по повреждаемости элементов цепи «источник – потребитель» лучше всего принимать по данным аварийной статистики сетей, к которым этот потребитель подключен. На практике такие данные либо отсутствуют, либо существенно неполны, поэтому для расчетов были использованы данные СПО «Союзтехэнерго» о ППО всех элементов цепи «источник – потребитель» применительно к сельскохозяйственному потребителю. Эти данные получены на базе обработки большого объема аварийной статистики по сельским электрическим сетям стран бывшего СССР.

С учетом сказанного количество внезапных отключений потребителя за год можно представить в виде

$$N = N_{\text{ВЛВ}} + N_{\text{ПС}} + N_{\text{ПС10}} + N_{10} + N_{\text{ТП}} + N_{\text{ВЛН}}, \quad (2)$$

где N – количество внезапных отключений потребителя из-за повреждений соответственно; $N_{\text{ВЛВ}}$ – на ЛЭП 110(35) кВ и в распределительном устройстве (РУ) 110(35) кВ присоединенных к ней ПС; $N_{\text{ПС}}$ – в трансформаторе питающей потребителя ПС 110(35)/10 кВ; $N_{\text{ПС10}}$ – в РУ 10 кВ ПС 110(35)/10 кВ; N_{10} – на питающей потребителя ВЛ 10 кВ; $N_{\text{ТП}}$ – в ТП 10/0,4 кВ, к которой подключен потребитель; $N_{\text{ВЛН}}$ – на питающей потребителя ВЛ 0,38 кВ.

Методика расчета количества внезапных отключений потребителя приведена в [2], порядок расчета количества отключений потребителя АПК при наличии в ТП 10/0,4 кВ местного АВР изложен в [3].

Расчет продолжительности внезапных отключений потребителей сельскохозяйственного назначения. Расчет вероятной продолжительности отключения потребителя по каждому элементу цепи «источник питания – потребитель» выполнен на основании моделирования действий оперативного и ремонтного персонала электрических сетей. Модели учитывают местные условия оперативного обслуживания ПС 110(35)/10 кВ: наличие дежурных на ПС, места дислокации ОВБ и зоны их обслуживания, расстояния между ПС, наличие устройств противоаварийной автоматики и т. д.

Значение средней продолжительности одного внезапного отключения потребителя определяется как среднее исходя из числа повреждений ос-

новых элементов цепи «источник – потребитель» и соответствующих им длительностей отключений по формуле [4]

$$\tau = \frac{N_{\text{ВЛВ}}\tau_{\text{ВЛВ}} + N_{\text{ПС}}\tau_{\text{ПС}} + N_{\text{ПС10}}\tau_{\text{ПС10}} + N_{10}\tau_{10} + N_{\text{ТП}}\tau_{\text{ТП}} + N_{\text{ВЛН}}\tau_{\text{ВЛН}}}{N_{\Sigma}}, \quad (3)$$

где τ – средние продолжительности внезапных отключений потребителя при повреждении соответственно; $\tau_{\text{ВЛВ}}$ – на ВЛ 110(35) кВ и в РУ 110(35) кВ присоединенных к ВЛ ПС 110(35)/10 кВ; $\tau_{\text{ПС}}$ – в трансформаторе 110(35)/10 кВ ПС и в тех элементах его присоединения, повреждения которых не приводят к отключению ВЛ 110(35) кВ; $\tau_{\text{ПС10}}$ – в РУ 10 кВ ПС 110(35) кВ; τ_{10} – на ВЛ 10 кВ; $\tau_{\text{ТП}}$ – на тех элементах оборудования ТП 10/0,4 кВ, повреждения которых не приводят к отключению ВЛ 10 кВ; $\tau_{\text{ВЛН}}$ – на ВЛ 0,38 кВ, питающей рассматриваемого потребителя; $N_{\text{ВЛВ}}, N_{\text{ПС}}, N_{\text{ПС10}}, N_{10}, N_{\text{ТП}}, N_{\text{ВЛН}}$ – см. пояснения к формуле (2).

В связи с тем, что вероятность повреждений в РУ 110(35) кВ ПС, приводящих к отключению ЛЭП 110(35) кВ, значительно меньше, чем вероятность повреждений ВЛ 110(35) кВ, величина продолжительности отключения потребителя $\tau_{\text{ВЛВ}}$ при повреждении на ВЛ 110(35) кВ и в РУ 110(35) кВ ПС определена как продолжительность отключения ВЛ 110(35) кВ.

Продолжительность $\tau_{\text{ВЛВ}}$ принята равной нулю при $N_{\text{ВЛВ}} = 0$. Для остальных случаев продолжительность отключения потребителя складывается из затрат времени на переезды для выполнения пробного включения отключившейся ВЛ 110(35) кВ, для деления цепи «источник – потребитель», т. е. локализации поврежденной ВЛ 110(35) кВ, для включения неповрежденных элементов указанной цепи.

Расчет продолжительности отключения потребителя $\tau_{\text{ПС}}$ при повреждении трансформатора 110 (35)/10 кВ на питающей ПС учитывает такие повреждения оборудования ПС (кроме повреждений в РУ 10 кВ), которые не приводят к отключению ЛЭП – это чаще всего повреждения трансформатора и его ошиновки до управляемых защитой аппаратов с обеих сторон. Для ПС 110/10 кВ с выключателями на линиях 110 кВ и с защитой шин 110 кВ это могут быть и повреждения на секциях шин 110 кВ. Продолжительность отключения потребителя $\tau_{\text{ПС}}$ при повреждении трансформатора 110(35) кВ на питающей ПС определена в зависимости от схемы ПС.

Расчет продолжительности отключения потребителя τ_{10} при повреждении сети 10 кВ сельскохозяйственного назначения значительно сложнее расчета этого же показателя для основной сети. Это обусловлено невысокой степенью оснащенности сельских сетей коммутационными аппаратами, средствами автоматики. Наибольшую сложность при расчете τ_{10} представляет определение продолжительности отключения потребителя за время отыскания поврежденного участка, его локализации и включения неповрежденных участков ВЛ 10 кВ, так как используемая при этом математическая модель процесса поиска повреждения и восстановления электроснабжения чрезвычайно сложная [5]. Упрощенный метод основан на выделении в схеме ВЛ 10 кВ части, содержащей электрическую связь меж-

ду питающей ПС 35(110)/10 кВ, ТП потребителя и ближайшим резервом, на который эту ТП можно переключить при исчезновении основного питания, или ближайшим концом линии, если указанного резерва нет [6].

Для пояснения дальнейших расчетов необходимо ввести еще один показатель надежности электроснабжения – суммарную продолжительность отключений потребителя в год, ч/год:

$$\tau_{\Sigma} = N\tau. \quad (4)$$

При расчетах продолжительности внезапных отключений потребителя были использованы нормы времени на ремонт и техническое обслуживание ВЛ и ТП, скорости передвижения ОВБ и другие данные, полученные СПО «Союзтехэнерго».

Результаты расчета основных показателей надежности для существующих схем электроснабжения потребителей АПК. По методикам, описанным выше, был произведен расчет количества и средней продолжительности внезапных отключений 42 потребителей АПК Гомельского РЭС. Для показателей надежности элементов цепи «источник питания – потребитель» с помощью пакета статистического анализа Statistica 6.0 были рассчитаны математическое ожидание M , выборочное среднее квадратическое отклонение S и доверительные интервалы для математического ожидания M с заданной надежностью β . Результаты расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета показателей надежности электроснабжения потребителей АПК Гомельского РЭС

Параметр	Среднее арифметическое значение M	Среднее квадратическое отклонение S	Доверительный интервал для M с надежностью $\beta = 0,95$	
Количество внезапных отключений потребителей, откл./год	4,082	3,489	2,995	5,169
в том числе из-за отказов:				
• ЛЭП 110(35) кВ	0,353	0,160	0,303	0,403
• трансформатора ПС 110(35)/10 кВ	0,028	0,006	0,026	0,030
• РУ 10 кВ ПС 110(35)/10 кВ	0,259	0,166	0,207	0,311
• ВЛ 10 кВ	2,932	3,402	1,872	3,992
• ТП 10/0,4 кВ	0,296	0,166	0,244	0,348
• ВЛ 0,4 кВ	0,214	0,241	0,139	0,289
Средняя продолжительность одного внезапного отключения потребителя, ч	3,420	1,536	2,941	3,899
в том числе из-за отказов:				
• ЛЭП 110(35) кВ	0,105	0,189	0,046	0,164
• трансформатора ПС 110(35)/10 кВ	0,504	1,097	0,162	0,846
• РУ 10 кВ ПС 110(35)/10 кВ	1,039	0,814	0,785	1,293
• ВЛ 10 кВ	3,965	2,291	3,251	4,679
• ТП 10/0,4 кВ	3,823	0,719	3,599	4,047
• ВЛ 0,4 кВ	4,148	0,654	3,944	4,352

На рис. 2 представлена диаграмма распределения количества отключений по элементам цепи «источник – потребитель», согласно которой самым ненадежным элементом цепи «источник – потребитель» является ВЛ 10 кВ. На долю отключений из-за повреждений на ВЛ 10 кВ приходится 71,8 % от общего числа отключений.

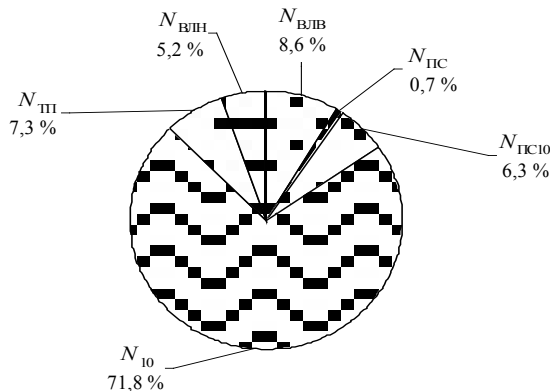


Рис. 2. Диаграмма распределения количества отключений по элементам цепи «источник – потребитель»: $N_{ВЛВ}$ – на ЛЭП 110(35) кВ и в РУ 110(35) кВ, присоединенных к ней ПС; $N_{ПС}$ – в трансформаторе, питающем потребителя ПС 110(35)/10 кВ; $N_{ПС10}$ – в РУ 10 кВ питающей потребителя ПС 110(35)/10 кВ; N_{10} – на питающей потребителя ВЛ 10 кВ; $N_{ТП}$ – в ТП 10/0,4 кВ, к которой подключен потребитель; $N_{ВЛН}$ – на питающей потребителя линии 0,38 кВ

Мероприятия по повышению надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей Гомельского РЭС. Основной целью мероприятий по повышению надежности электроснабжения является снижение количества, продолжительности внезапных отключений потребителя и ущерба от недоотпуска электроэнергии при перерывах электроснабжения.

Для выбранных потребителей Гомельского РЭС были предложены следующие мероприятия по повышению надежности электроснабжения [7]:

- 1) замена неизолированных проводов на самонесущие изолированные провода на участках ВЛ 10 кВ, проходящих через лес;
- 2) замена неизолированных проводов на изолированные для ВЛ 0,4 кВ, питающих потребителя;
- 3) применение в ТП 10/0,4 кВ на стороне 10 кВ местного АВР.

Основные преимущества самонесущих изолированных проводов изложены в [8]. Наибольшую целесообразность для ВЛ 10 кВ имеет замена проводов на участках линий, проходящих через лес, так как на них происходит наибольшее количество повреждений, приводящих к отключению потребителей.

Согласно расчетам основных показателей надежности электроснабжения для 23 потребителей замена неизолированных проводов на самонесущие изолированные на участках девяти ВЛ 10 кВ, проходящих через лес, позволяет уменьшить количество внезапных отключений потребителей N_{10} из-за повреждений на питающей ВЛ 10 кВ в среднем в 1,31 раза; сни-

жение общего количества отключений N и суммарной продолжительности отключений потребителя в год τ_{Σ} представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты внедрения предложенных мероприятий по повышению надежности электроснабжения потребителей АПК Гомельского РЭС

Мероприятие	Снижение количества внезапных отключений потребителей, о. е.	Снижение суммарной продолжительности внезапных отключений потребителя в год, о. е.
Замена на участках ВЛ 10 кВ проходящих через лес неизолированных проводов на изолированные	1,21	1,27
Замена неизолированных проводов на изолированные для ВЛ 0,4 кВ	1,05	1,06
Применение в ТП 10/0,4 кВ на стороне 10 кВ местного АВР	2,21	2,08

На ВЛ 0,4 кВ в качестве мероприятия по повышению надежности электроснабжения предложено заменить провода на самонесущие изолированные. Две ВЛ 0,4 кВ, питающие потребителей, к настоящему времени уже выполнены изолированными проводами, поэтому из расчета данного мероприятия по повышению надежности исключены.

Результаты расчета представлены в табл. 2. Замена неизолированных проводов на изолированные для сорока ВЛ 0,4 кВ позволяет уменьшить количество внезапных отключений потребителя $N_{\text{ВЛН}}$ из-за повреждений на питающей потребителя линии 0,38 кВ в среднем в 5,88 раза, снижение общего количества отключений N и суммарной продолжительности отключений потребителя в год τ_{Σ} представлены в табл. 2.

Применение местного АВР на стороне 10 кВ возможно в пяти проходных ТП. Результаты расчета представлены в табл. 2. Это мероприятие позволяет сократить количество внезапных отключений потребителя N_{10} из-за повреждений на питающей потребителя ВЛ 10 кВ в среднем в 12,5 раза, среднюю продолжительность одного внезапного отключения потребителя τ_{10} при повреждении на ВЛ 10 кВ – в 1,54 раза; снижение общего количества отключений N и суммарной продолжительности отключений потребителя в год τ_{Σ} представлены в табл. 2.

Ущерб от перерывов электроснабжения потребителей сельскохозяйственного назначения. Ожидаемый годовой недоотпуск электроэнергии потребителю от внезапных перерывов электроснабжения рассчитывается по формуле

$$\Delta W_{\text{п}} = \frac{W_{\text{п}}}{8760} N \tau, \quad (5)$$

где $W_{\text{п}}$ – величина годового потребления активной электрической энергии рассматриваемым потребителем, кВт·ч; N – количество внезапных отключений потребителя в год, откл./год; τ – средняя продолжительность одного внезапного отключения, ч.

Величины N и τ рассчитываются по соответствующим методикам.

Величина ожидаемого ущерба потребителей сельскохозяйственного назначения от перерывов электроснабжения

$$Y_n = y_0 \Delta W_n, \quad (6)$$

где y_0 – удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии рассматриваемому потребителю, руб./кВт·ч).

В качестве сведений об ущербе, который несут потребители при перерывах электроснабжения, использованы величины удельных ущербов из [9], представленные в столбце 3 табл. 3. Эти данные скорректированы с учетом изменения цен после 1991 г. с помощью коэффициента пересчета стоимости основных средств для группы 14 (с 2004 г. группы 16) – «Сельскохозяйственные машины и оборудование» и приведены в столбце 4 табл. 3.

Таблица 3

Удельный ущерб от перерывов электроснабжения сельскохозяйственных потребителей

№ п/п	Потребитель	Удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии, руб./кВт·ч	
		в ценах 1988 г.	в ценах 2007 г.
1	2	3	4
1	Животноводческий комплекс по производству молока	1,8	12658,50
2	Животноводческая ферма по производству молока	1,8	12658,50
3	Животноводческий комплекс по выращиванию и откорму молодняка КРС	3,1	21800,75
4	Животноводческая ферма по выращиванию и откорму молодняка КРС	3,1	21800,75
5	Животноводческий комплекс по выращиванию нетелей	3,1	21800,75
6	Животноводческая ферма по выращиванию нетелей	3,1	21800,75
7	Площадка по откорму КРС	3,1	21800,75
8	Животноводческий комплекс по выращиванию и откорму свиней	29	203942,48
9	Животноводческая ферма по выращиванию и откорму свиней	3,9	27426,75
10	Птицеферма по производству яиц	5,7	40085,25

Снижение ущерба от недоотпуска электроэнергии при перерывах электроснабжения потребителей АПК в результате внедрения указанных мероприятий по повышению надежности в зависимости от коэффициента загрузки ТП 10/0,4 кВ, питающих потребителей, представлено в табл. 4.

Таблица 4

Снижение ущерба от перерывов электроснабжения потребителей сельскохозяйственного назначения

Коэффициент загрузки ТП	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

Мероприятие	Замена неизолированных проводов на самонесущие изолированные на участках ВЛ 10 кВ									
Снижение ущерба, тыс. руб.	1920,8	3841,6	5762,5	7683,3	9604,1	11524,9	13445,8	15366,6	17287,4	19208,2

Окончание табл. 4

Коэффициент загрузки ТП	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Мероприятие	Замена неизолированных проводов на изолированные для ВЛ 0,4 кВ, питающих потребителя									
Снижение ущерба, тыс. руб.	422,5	845,0	1267,5	1690,0	2112,5	2535,0	2957,6	3380,1	3802,6	4225,1
Мероприятие	Применение в ТП 10/0,4 кВ на стороне 10 кВ местного АВР									
Снижение ущерба, тыс. руб.	6950,7	13901,5	20852,2	27802,9	34753,7	41704,4	48655,1	55605,9	62556,6	69507,3

ВЫВОДЫ

1. С помощью разработанной методики были определены основные показатели надежности электроснабжения 42 потребителей Гомельского РЭС: количество внезапных отключений составило 4,082 откл./год, средняя продолжительность одного внезапного отключения – 3,420 ч.

2. Для отдельных потребителей предложены мероприятия по повышению надежности электроснабжения, которые согласно расчетам позволят снизить количество, суммарную продолжительность внезапных отключений потребителей и ущерб от недоотпуска электроэнергии при перерывах электроснабжения.

3. Результаты расчетов по предложенной методике также могут быть использованы при заключении с потребителями договоров на электроснабжение и пользование электрической энергией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по обеспечению при проектировании нормативных уровней надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей / В. В. Тисленко [и др.]. – М.: Сельэнергопроект, 1986. – 32 с.
2. Куценко, Г. Ф. Методика определения расчетного количества внезапных отключений потребителей сельскохозяйственного назначения по цепи «источник – потребитель» / Г. Ф. Куценко, О. Ю. Пухальская // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2005. – № 3. – С. 30–33.
3. Куценко, Г. Ф. Расчет количества отключений потребителя АПК при наличии пунктов АВР / Г. Ф. Куценко, О. Ю. Пухальская, О. С. Шведова // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2005. – № 1. – С. 31–34.
4. Русан, В. И. Основные положения методики расчета продолжительности отключения потребителей АПК при повреждении элементов схемы электроснабжения / В. И. Русан, О. Ю. Пухальская // Перспективы и направления развития энергетики АПК: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–23 ноября 2007 г. / Бел. гос. аграрн. техн. ун-т; редкол.: М. А. Прищепов [и др.]. – Минск, 2007. – С. 71–76.
5. Прусс, В. Л. Повышение надежности сельских электрических сетей / В. Л. Прусс, В. В. Тисленко. – Л.: Энергоатомиздат. 1989. – 208 с.
6. Пухальская, О. Ю. Методика расчета продолжительности отключения потребителя агропромышленного комплекса при повреждении на ВЛ 10 кВ без автоматики / О. Ю. Пухальская // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2008. – № 1. – С. 27–36.
7. Лещинская, Т. Б. Электроснабжение сельского хозяйства / Т. Б. Лещинская, И. В. Наумов. – М.: КолосС, 2008. – 650 с.
8. Короткевич, М. А. Эксплуатация электрических сетей: учеб. / М. А. Короткевич. – Минск: Вышэйш. шк., 2005. – 364 с.
9. Правила применения скидок (надбавок) к тарифу на электрическую энергию, отпускаемую предприятиями электрических сетей Минэнерго СССР сельскохозяйственным

потребителям и установления штрафов за перерывы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. – М.: Союзтехэнерго, 1988.

Представлена кафедрой
электроснабжения ГГТУ

Поступила 10.04.2009