

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА /  
POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION  
УДК 621.31  
DOI: 10.26897/2687-1149-2020-2-57-63

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

**БЕЛОВ СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ**, канд. техн. наук, доцент  
E-mail: sbelov-@mail.ru

**ПЕТРОВ ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ**  
E-mail: petrov\_ps@inbox.ru

**ДМИТРИЕВ НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**  
E-mail: dmitriev\_na@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, Москва, ул. Тимирязевская, 49.

В статье проведён анализ средств и методов повышения надёжности сельских распределительных сетей. Рассмотрены существующие методы по использованному математическому аппарату, способу задания исходной информации и воспроизводимым режимам функционирования электрической сети. Представлена схема технических средств повышения надёжности (СПН) электроснабжения потребителей. Сделан вывод о том, что рассмотренные методы расчёта показателей надёжности электроснабжения потребителей недостаточно точны, что в практической деятельности затрудняет принятие правильного решения по обеспечению требуемого уровня надёжности электроснабжения потребителей. Представлена усовершенствованная методика определения удельной частоты отказов электроснабжения сельскохозяйственных потребителей и обоснованы факторы, влияющие на удельную частоту отказов электроснабжения потребителя. В усовершенствованной методике частота отказов – это величина нестационарная, зависящая от типа электрооборудования, СПН, климатических условий, года ввода в эксплуатацию, года капитального ремонта, реконструкции и расчётного года, что значительно повышает точность расчётов.

**Ключевые слова:** электроснабжение, повышение надёжности, распределительные сети, энергетика, методы расчёта, анализ.

**Формат цитирования:** Белов С.И., Петров П.С., Дмитриев Н.А. Усовершенствование методики определения удельной частоты отказов электроснабжения сельскохозяйственных потребителей // *Агроинженерия*. 2020. № 2(96). С. 57-63. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-2-57-63.

## IMPROVING THE METHOD FOR DETERMINING SPECIFIC FREQUENCY OF ELECTRICITY SUPPLY FAILURES FOR AGRICULTURAL CONSUMERS

**SERGEY I. BELOV**, PhD (Eng), Associate Professor  
E-mail: Sbelov-@mail.ru

**PAVEL S. PETROV**  
E-mail: petrov\_ps@inbox.ru

**NIKOLAY A. DMITRIEV**  
E-mail: dmitriev\_na@mail.ru

Russian Timiryazev State Agrarian University; 127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49.

The authors consider and analyze means and methods of improving the reliability of rural distribution networks. The paper discusses various means of improving reliability, systematized according to various criteria: by the method of increasing the technical and economic efficiency of power supply, the place of installation in the power grid, the mode of operation of the power supply system and the functional purpose. Additionally, a diagram of technical means to increase the reliability of power supply to consumers is presented. The analysis results in a conclusion that the considered methods for calculating the reliability indicators of power supply to consumers are not accurate enough and, therefore, this makes it difficult to make the right decision in practice to ensure the required reliability level of power supply to consumers. The authors present improved methodology for determining the specific frequency of power supply failure of agricultural consumers and provide the rationale for factors affecting this condition. In the improved methodology, the failure rate is a non-stationary value, depending on the type of electrical equipment,

the means of improving reliability, climatic conditions, the year of commissioning, the year of major repair, reconstruction and, the estimated year, which significantly increases the analysis accuracy.

**Key words:** power supply, reliability improvement, power distribution grids, power engineering, calculation and analysis methods.

**For citation:** Belov S.I., Petrov P.S., Dmitriev N.A. Determining the frequency of electrical equipment maintenance in agricultural production. *Agricultural Engineering*, 2020; 2 (96): 57-63. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2020-2-57-63.

**Введение.** Применение зарекомендовавших себя средств и методов повышения надёжности сокращает время устранения повреждений и уменьшает частоту отказов элементов сети и тем самым позволяет сократить аварийный недоотпуск электроэнергии и ущерб от перерывов в электроснабжении [1].

В целях представления реальной «картины» повреждения ВЛ 10 кВ и расчёта точных значений показателей надёжности электроснабжения (ПНЭ) потребителей необходимо усовершенствовать методику расчёта частоты отказов электроснабжения потребителей, учитывающей номенклатуру разнообразных средств повышения надёжности (СПН), применяемых в сельских электрических сетях.

**Цель исследования** – анализ существующих методов расчёта надёжности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, усовершенствование методики определения удельной частоты отказов электроснабжения сельскохозяйственных потребителей.

**Материал и методы.** Объектом исследования является методика определения удельной частоты отказов электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. Используются методы статистического и системного анализа, синтеза и математического моделирования.

**Результаты и обсуждение.** СПН могут быть систематизированы по различным признакам: способу повышения технико-экономической эффективности электроснабжения, месту установки в электросети, режиму работы системы электроснабжения и функциональному назначению.

Описание технических характеристик и особенности применения различных типов СПН освещены в работах Т.Б. Лещинской, Д.Л. Файбисовича, Д.Т. Комарова, Ю.Н. Руденко и В.А. Семенова, Р.Ф. Стасенко и других авторов [1-4].

При определении ПНЭ потребителей учитываются повреждения ВЛ 10 кВ, приводящие к отключению электроснабжения потребителя. Поэтому в усовершенствованной методике рассматриваются СПН, используемые для локализации и скорейшей ликвидации таких повреждений. На рисунке 1 приведена схема технических СПН, составляющих основу имитационной модели действий оперативной бригады в процессе ликвидации повреждения на ВЛ 10 кВ. Пример такой модели показан на рисунке 2, действия бригады представлены в таблице. На практике СПН взаимно дополняют друг друга, их сочетание и размещение может по-разному влиять на надёжность электроснабжения потребителей.

Расчёт надёжности распределительных сетей и методы определения ПНЭ потребителей с учётом их классификации по использованному математическому аппарату, способу задания исходной информации и воспроизводимым режимам функционирования электрической сети представлены в работах Ю.Б. Гука, В.Т. Китушина, О.А. Терешко и др. [5-7].

Анализ разработанных методов расчёта ПНЭ позволяет сделать следующие выводы:

1. В существующих методах не учитывается нестационарность частоты отказов, т.е. динамика её изменения в зависимости от года строительства, реконструкции, капитального ремонта и климатических условий данного района.

2. В большинстве разработанных методов не уделяется внимание средствам ускорения поиска повреждений. Например, переносной сетевой указатель короткого замыкания не рассматривается ни в одном методе.

3. Предлагаемые некоторыми авторами методы расчёта ПНЭ на базе имитационных моделей электрической сети не используют оптимальных стратегий поиска повреждённого участка и форму оперативного обслуживания РЭС.

4. В ряде методов сложный разветвлённый вид электрических схем не учитывается и заменяется путём или «каналом» электроснабжения потребителя.

На основании опыта эксплуатации установлено, что работоспособность различных элементов системы электроснабжения характеризуется удельным ПНЭ. В основе определения количественных характеристик надёжности в разных режимах и в различные периоды работы системы электроснабжения лежит математический анализ данных об отказах и об аварийно-восстановительных работах [8, 9]. В условиях эксплуатации отказы электрооборудования представляют собой случайные события и регистрируются во времени. Интервалы времени между этими авариями и ремонтами также являются случайными событиями. Такая очерёдность следующих один за другим отказов и восстановлений в теории массового обслуживания характеризуется соответственно как частота отказов и частота восстановлений [10].

Для электротехнического оборудования, используемого в системе электроснабжения, теоретическая зависимость частоты отказов от срока эксплуатации изображена на рисунке 3.

Первая зона в интервале времени  $0-t_1$  характеризуется снижением частоты отказов. Такая зависимость имеет место в период эксплуатационной приработки оборудования, когда выявляются различные дефекты изготовления, строительства, монтажа, а также возможные ошибки персонала, осваивающего новое оборудование.

Вторая зона ( $t_1-t_2$ ), характерна для периода нормальной эксплуатации, параметр частоты отказов практически не изменяется.

Третья зона в интервале  $t_2-t_3$  соответствует периоду физического старения оборудования, приводящего к последовательному увеличению частоты отказов.

Точка  $t_3$  характеризуется капитальным ремонтом или реконструкцией оборудования. После точки  $t_3$  должен начинаться цикл, состоящий из периодов I-III.

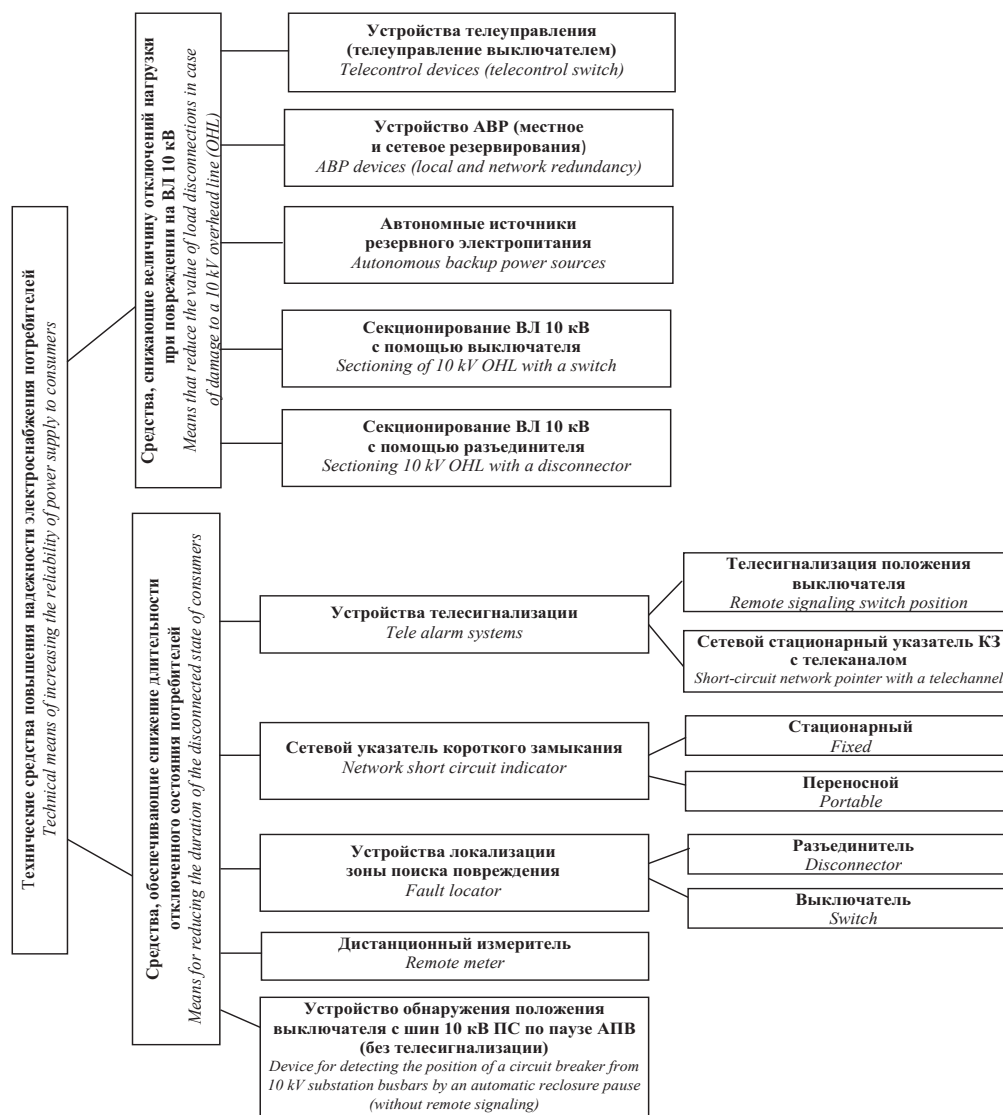


Рис. 1. Схема технических средств повышения надёжности электроснабжения потребителей, учитываемых в имитационной модели электрической сети

Fig. 1. Scheme of technical means to improve the reliability of power supply to consumers, taken into account in the simulation model of the power grid

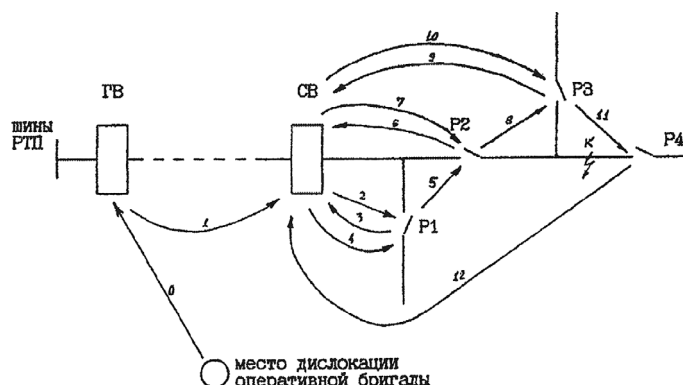


Рис. 2. Пример имитационной модели действий оперативной бригады в процессе ликвидации повреждения на ВЛ 10 кВ: ГВ – головной выключатель; СВ – секционный выключатель; P1...P4 – разъединители; К – место короткого замыкания (в результате повреждения); 0...12 – порядок действий оперативной бригады в процессе ликвидации повреждения

Fig. 2. Example of a simulation model of the operational team actions in the process of eliminating damage on a 10 kV overhead line:

ГВ – head switch; СВ – sectional switch; P1...P4 – disconnectors; К – the place of a short circuit (as a result of damage); 0...12 – operational team actions in the process of damage eliminating

Действия оперативной бригады в процессе отыскания повреждённого участка

The actions of the operational team in the process of finding the damaged area

Номер операции <i>Operation number</i>	Номер переезда <i>Relocation number</i>	Цель операции <i>Purpose of operation</i>	Информация о повреждении <i>Damage information</i>
1	0	<b>Переезд оперативной бригады на РТП</b> <i>Relocation of the operational team to a distribution transformer substation</i>	Нет <i>no</i>
2	1	<b>Переезд оперативной бригады на отключённый СВ</b> <i>Relocation of the operational team to the disabled</i>	Нет <i>no</i>
3	2	<b>Отключение Р1</b> <i>P1 shutdown</i>	Нет <i>no</i>
4	3	<b>Включение СВ</b> <i>Sectional switch turning on</i>	Нет <i>no</i>
5	-	<b>Отключение КЗ СВ (релейной защитой)</b> <i>Short circuit disconnection of sectional switch (relay protection)</i>	Нет <i>no</i>
6	4	<b>Включение Р1</b> <i>P1 turning on</i>	Нет <i>no</i>
7	5	<b>Отключение Р2</b> <i>P2 shutdown</i>	Нет <i>no</i>
8	6	<b>Включение СВ</b> <i>Sectional switch turning on</i>	Нет <i>no</i>
9	-	<b>СВ остаётся отключённым</b> <i>Sectional switch stays off</i>	Нет <i>no</i>
10	-	<b>Отключение СВ</b> <i>Shutdown of sectional switch</i>	Нет <i>no</i>
11	7	<b>Отключение Р2</b> <i>P2 shutdown</i>	Нет <i>no</i>
12	8	<b>Отключение Р3</b> <i>P3 shutdown</i>	Нет <i>no</i>
13	9	<b>Включение СВ</b> <i>Sectional switch turning on</i>	Нет <i>no</i>
14	-	<b>Отключение КЗ СВ (релейной защитой)</b> <i>Short circuit disconnection of sectional switch (relay protection)</i>	Нет <i>no</i>
15	10	<b>Включение Р3</b> <i>P3 turning on</i>	Нет <i>no</i>
16	11	<b>Отключение Р4</b> <i>P3 shutdown</i>	Нет <i>no</i>
17	12	<b>Включение СВ</b> <i>Sectional switch turning on</i>	Нет <i>no</i>
18	-	<b>Отключение КЗ СВ (релейной защитой)</b> <i>Short circuit disconnection of sectional switch (relay protection)</i>	Есть <i>yes</i>

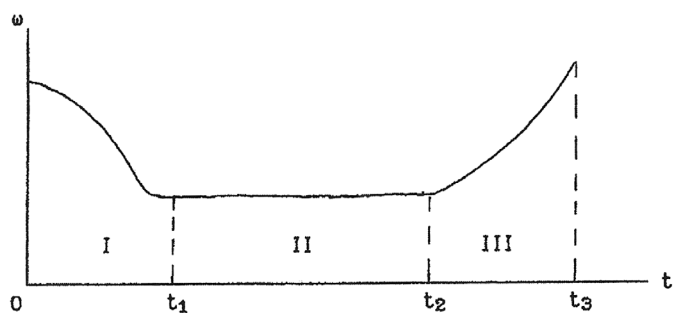


Рис. 3. Зависимость среднего значения частоты отказов электрооборудования от срока эксплуатации

Fig. 3. Relationship between the average value of the electrical equipment failure frequency and the service life

Для математического описания теоретической зависимости, изображённой на рисунке 3, часто используют закон Вейбула [9], который имеет вид:

$$\omega(t) = a \omega t^{(a-1)}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – частота отказов в период нормальной эксплуатации электрооборудования, когда частота отказов практически не изменяется;  $t$  – временной промежуток с момента ввода в эксплуатацию электрооборудования и до расчётного года;  $a$  – коэффициент, характеризующий изменение частоты отказов во времени. При  $a > 1$  частота отказов монотонно возрастает, при  $a < 1$  – монотонно убывает, а при  $a = 1$  – остается неизменной.

Однако при эксплуатации электрических сетей 10 кВ зависимость  $\omega = f(t)$ , изображённая на рисунке 3, может выглядеть совершенно иначе.

Большинство сетей 10 кВ сельскохозяйственного назначения строились в 60-70-е гг., и сейчас их работоспособное состояние поддерживается капитальными ремонтами, причем если в ходе ремонта заменяется оборудование, то оно уже разработано и прошло эксплуатационную приработку (обслуживающему персоналу оно знакомо и дефекты проектирования электрооборудования давно выявлены). Поэтому отпадает необходимость в моделировании зависимости  $\omega = f(t)$  для периода приработки оборудования. После капитального ремонта начинается постепенное увеличение частоты отказов, и вторая и третья зоны графика рисунка 3 сливаются в одну зону. Эта модель построена на разделении отказов на внезапные, которые появляются в результате резкого, внезапного изменения факторов внешней среды, и постепенные, при которых наблюдается плавное, постепенное изменение параметра частоты отказов элементов в результате износа. Такое разделение отказов носит очень условный характер, и неучёт в этой модели капитальных ремонтов и реконструкций электрической сети вносит существенную погрешность в расчёт частоты отказов электроснабжения потребителей. Поэтому для моделирования процесса изменения частоты отказов во времени выбрана математическая модель, основанная на статистической обработке исходного материала и достоверном отражении процесса старения оборудования ВЛ 10 кВ в процессе эксплуатации.

В модели рассматриваются два события, после которых увеличивается надёжность электрооборудования – реконструкция и капитальный ремонт. Разница между двумя способами восстановления работоспособности оборудования состоит в том, что при реконструкции, проводимой реже, чем капитальный ремонт, электросетевому объекту возвращают прежнее состояние и процесс старения идет также, как у вновь введённого в эксплуатацию оборудования, а при капитальном ремонте надёжность объекта повышается, но процесс старения идёт быстрее (рис. 4, 5).

В модели соотношение величин частот отказов после нескольких капитальных ремонтов выражается следующим образом:

$$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \dots < \omega_n, \quad (2)$$

где  $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \dots < \omega_n$  – частота отказов элементов электросети соответственно после 1-го, 2-го, 3-го, ... n-го капитального ремонта.

Одним из основных факторов, влияющих на величину частоты отказов электрооборудования, является близость расчётного года к году ввода в эксплуатацию, капитально-го ремонта и реконструкции.

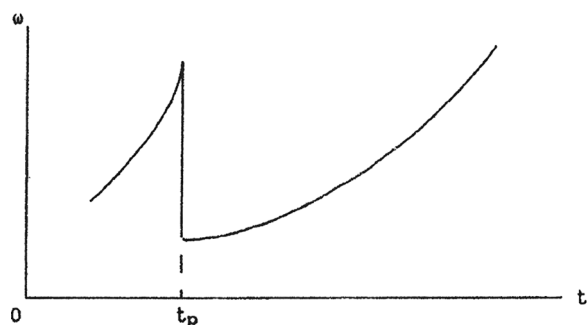


Рис. 4. Характер зависимости  $\omega = f(t)$

Fig. 4. Dependence type  $\omega = f(t)$

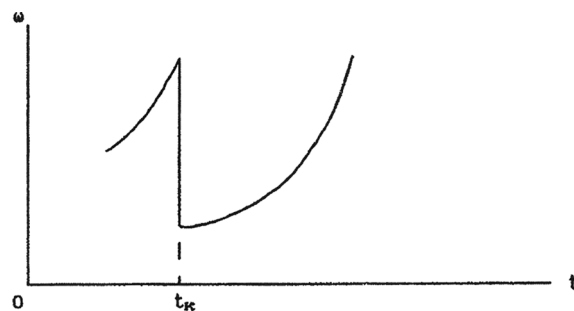


Рис. 5. Характер зависимости  $\omega = f(t)$  после проведения капитального ремонта ( $t_k$ )

Fig. 5. Dependence type  $\omega = f(t)$  after major repairs ( $t_k$ )

На надёжность электрооборудования влияют и природно-климатические условия РЭС. Учёт климатических условий возможен тремя способами:

- 1) расчётом математического ожидания удельных частот отказов электрооборудования ( $\omega$ ) на основании обработанного массива статистических данных по надёжности для данного РЭС или ПЭС;
- 2) представлением математического ожидания удельных отказов электрооборудования в виде:

$$\omega_{\text{рас}} = K \cdot \omega, \quad (3)$$

где  $\omega$  – математическое ожидание удельной частоты отказов электрооборудования в среднем по рассматриваемому региону;  $K$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние климатических условий на надёжность электрооборудования в данном РЭС или ПЭС по отношению к среднему значению  $\omega$  по всему региону;

- 3) представлением математического ожидания удельных отказов электрооборудования в виде:

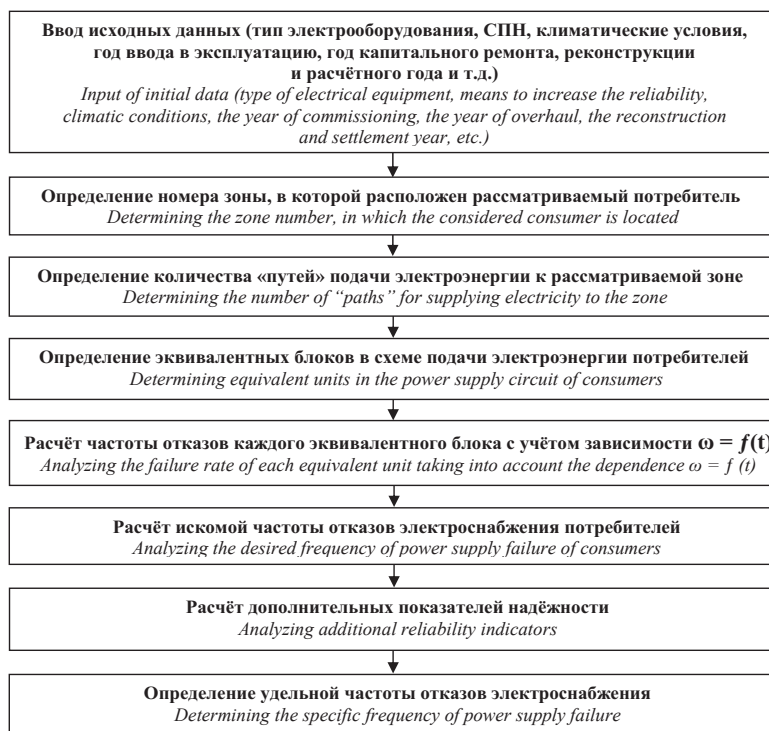
$$\omega = \omega_{\text{гол}} + \omega_{\text{гр}} + \omega_{\text{нав}} + \omega_{\text{вет}} + \omega_{\text{снег}} + \omega_{\text{ост}}, \quad (4)$$

где  $\omega = \omega_{\text{гол}} + \omega_{\text{гр}} + \omega_{\text{нав}} + \omega_{\text{вет}} + \omega_{\text{снег}} + \omega_{\text{ост}}$  – математическое ожидание частоты отказов электрооборудования соответственно для гололёдного, грозового, паводкового, ветрового, снегового и остальных периодов.

Для усовершенствования методики авторами выбран первый вариант учёта влияния климатических условий на надёжность электрооборудования. Этот выбор обусловлен трудностью получения достоверного статистического материала о ПНЭ, особенно для определённого периода года.

Еще одним фактором, влияющим на надёжность электроснабжения потребителя, является марка и тип применяемого электрооборудования. Учёт этого фактора в методике осуществлён путём задания удельных показателей надёжности конкретного типа оборудования.

В представленной методике учитывается надёжность и местоположение пунктов автоматического секционирования и резервирования ВЛ 10 кВ. Другие СПН (например, устройство автоматического повторного включения) не рассматриваются, т.к. они не повышают надёжность при устойчивых повреждениях, приводящих к длительному отключению потребителей. Модель предложенной методики показана на рисунке 6.



**Рис. 6. Модель усовершенствованной методики определения удельной частоты отказов электроснабжения сельскохозяйственных потребителей**

**Fig. 6. Model of an improved methodology for determining specific frequency of power supply failures in agricultural consumers**

**Выводы**

1. Выявлена необходимость усовершенствования методики определения ПНЭ потребителей с учётом многообразия технических СПН, формы оперативного обслуживания, нестационарности частоты отказов элементов электрической схемы и других исходных данных.

2. В усовершенствованной методике частота отказов – это величина нестационарная и зависит от типа электрооборудования, СПН, климатических условий, года ввода в эксплуатацию, года капитального ремонта, реконструкции и расчётного года, что значительно повышает точность расчётов.

**Библиографический список**

1. Комаров Д.Т. Автоматизация электрических сетей 0,38-35 кВ в сельских районах. М.: Электроатомиздат, 1987. 112 с.  
 2. Лещинская Т.Б. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник для техникумов по специальности 3107 – Электрификация и автоматизация сельского хозяйства. М.: Колос, 2006. 368 с.  
 3. Файбисович Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей. 3-е издание. М.: НЦ ЭНАС, 2009. 392 с.  
 4. Надёжность систем энергетики и их оборудования. Справочник в 4 т. / Под общей ред. Ю.Н. Руденко. Т. 2. Надёжность электроэнергетических систем / Под ред. М.Н. Розанова. М.: Энергоатомиздат, 2000. 568 с.  
 5. Надёжность электроэнергетических установок и систем: Теория и практика / А.П. Васильев, Ю.Б. Гук, В.В. Карпов. – СПб.: Ленгосэнергонадзор, 2000. 172 с.  
 6. Китушин В.Г. Надёжность энергетических систем. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 256 с.  
 7. Терешко О.А. Методика расчёта показателей надёжности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. М.: Всесоюзный институт повышения

**References**

1. Komarov D.T. Avtomatizatsiya elektricheskikh setey 0,38-35 kV v sel'skikh rayonakh [Automation of electrical networks 0.38-35 kV in rural areas]. Moscow, Elektroatomizdat, 1987: 112. (In Rus.)  
 2. Leshchinskaya T.B. Elektrosnabzheniye sel'skogo khozyaistva: uchebnik dlya tekhnikumov po spetsial'nosti 3107 – Elektrifikatsiya i avtomatizatsiya sel'skogo khozyaistva [Farm power supply: study manual for technical universities; Major 3107 – Electrification and Automation of Agriculture. Moscow, Kolos, 2006: 368. (In Rus.)  
 3. Faybisovich D.L. Spravochnik po proyektirovaniyu elektricheskikh setey [Reference for the design of power grids]. 3<sup>rd</sup> edition. Moscow, NTs ENAS, 2009: 392. (In Rus.)  
 4. Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya. Spravochnik v 4 t. [Reliability of energy systems and their equipment. Handbook in 4 vol.] / Ed. by Yu.N. Rudenko. Vol. 2. Nadezhnost' elektroenergeticheskikh sistem [Reliability of electric power systems] / Ed. by M.N. Rozanov. Moscow, Energoatomizdat, 2000: 556. (In Rus.)  
 5. Vasil'yev A.P., Guk Yu.B., Karpov V.V. Nadezhnost' elektroenergeticheskikh ustanovok i sistem: Teoriya i praktika

квалификации руководящих работников и специалистов, 1991. 54 с.

8. Пospelov Г.Е., Русан В.И. Надёжность электроустановок сельскохозяйственного назначения. Минск: Ураджай, 1982. 166 с.

9. Гук Ю.Б. Практика обеспечения надёжной работы электрооборудования: учеб. пособие. СПб.: СПбГТУ, 1992. 64 с.

10. Фокин Ю.А. Надёжность и эффективность сетей электрических систем. М.: Высш. шк., 1989. 152 с.

[Reliability of electric power plants and systems: Theory and practice]. SPb., Lengosenergonadzor, 2000: 172. (In Rus.)

6. Kitushin V.G. Nadezhnost' energeticheskikh sistem [Reliability of power supply systems]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2003: 256. (In Rus.)

7. Tereshko O.A. Metodika raschota pokazateley nadezhnosti elektrosnabzheniya sel'skokhozyaistvennykh potrebiteley [Methodology for calculating the reliability indicators of power supply to agricultural consumers]. Moscow, Vsesoyuzniy institut povysheniya kvalifikatsii rukovodyashchikh rabotnikov i spetsialistov, 1991: 54. (In Rus.)

8. Pospelov G.Ye., Rusan V.I. Nadozhnost' elektroustanovok sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya [Reliability of agricultural electrical installations]. Minsk, Uradzhay, 1982: 166. (In Rus.)

9. Guk Yu.B. Praktika obespecheniya nadezhnoy raboty elektrooborudovaniya: ucheb. posobiye [Practice of ensuring the reliable operation of electrical equipment: Study manual]. SPb., SPBG TU, 1992: 64. (In Rus.)

10. Fokin Yu.A. Nadozhnost' i effektivnost' setey elektricheskikh sistem [Reliability and efficiency of power distribution grids]. Moscow, Vyssh. shk., 1989:152. (In Rus.)

#### **Критерии авторства**

Белов С.И., Петров П.С., Дмитриев Н.А. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Белов С.И., Петров П.С., Дмитриев Н.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Статья поступила 17.02.2020**

**Опубликована 27.04.2020**

#### **Contribution**

S.I. Belov, P.S. Petrov, N.A. Dmitriev performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. S.I. Belov, P.S. Petrov, N.A. Dmitriev have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

**The paper was received on February 17, 2020**

**Published 27.04.2020**