

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы

УДК 621.315.23

DOI 10.37493/2307-907X.2022.1.1

**Петров Денис Васильевич, Маругин Валерий Игоревич,
Петров Антон Васильевич****АНАЛИЗ АВАРИЙНОСТИ И СРОКОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ГОРОДСКИХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6-10 КВ**

В условиях роста энергопотребления в городах, надежности систем электроснабжения уделяется все более серьезное внимание. Одним из показателей надежности электроснабжения потребителей является среднее время послеаварийного восстановления линии. При эксплуатации кабельных линий важно располагать данными о потоке отказов в КЛ и среднем времени их восстановления. А также учесть сезонные изменения потока отказов в городских КЛ и рассмотреть влияние потока отказов на время восстановления линии.

Ключевые слова: кабельные линии, надежность, аварийные отключения, параметр потока отказов, коэффициент простоя, время восстановления КЛ, очередь заявок в ремонт.

**Denis Petrov, Valery Marugin, Anton Petrov
ANALYSIS OF ACCIDENT AND RESTORATION TIMES OF 6-10 KV
URBAN CABLE LINES**

With the growth of energy consumption in cities and the reliability of power supply systems, more and more attention is paid. One of the indicators of the reliability of power supply to consumers is the average time of the post-emergency restoration of the line. When operating cable lines, it is important to have data on the flow of failures in cable lines and the average time of their recovery. And also take into account the seasonal changes in the flow of failures in urban cable lines and consider the influence of the flow of failures on the recovery time of the line.

Key words: cable lines, reliability, emergency shutdowns, failure flow parameter, downtime ratio, cable line restoration time, queue of requests for repair.

Введение / Introduction. Надежность электроснабжения в экономике любой страны занимает особое место. Перерывы электроснабжения потребителей могут привести к прекращению технологических процессов, порче и недоотпуску продукции и другим ущербам [1]. Поэтому вопросам диагностики и восстановления систем электроснабжения уделяется большое внимание [2, 3].

В городской среде для распределения электроэнергии в основном используют кабельные линии 6–10 Кв [4, 5]. На текущий момент отмечается рост числа аварийных отключений КЛ, а также увеличение времени восстановления поврежденной кабельной линии в г. Ставрополе [6, 7], что отрицательно сказывается на общей надежности систем электроснабжения города.

Материалы и методы / Materials and methods. Данная статья опирается на эмпирические методы прямого и опосредованного наблюдений, а также метод статистического анализа данных.

Результаты и обсуждение / Results and discussion. На рисунке 1 представлен график числа аварийных отключений КЛ 6–10 кВ города Ставрополя, который подтверждает негативную динамику увеличения аварийности городских распределительных сетей.

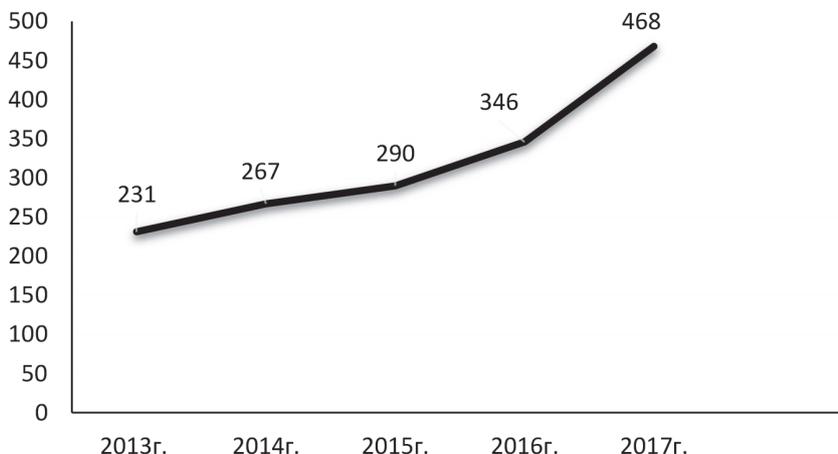


Рис. 1. Количество аварийных отключений в КЛ г. Ставрополя в 2013–2017 гг.

В таблице 1 представлена длина КЛ 6 и 10 кВ по годам рассматриваемого периода 2013–2017 гг. [7], а также количество отказов в соответствующий год. Таким образом, можно подсчитать параметр потока отказов ω в динамике.

Таблица 1

Протяженность кабельных линий 6-10 кВ

Год наблюдения	2013	2014	2015	2016	2017
Длина, км	908,6	926,7	939,3	967,4	1106,5
Количество отказов	231	267	290	346	468
ω , отказ на км\год	0,254	0,288	0,309	0,358	0,423

Из диаграммы рисунка 2 хорошо заметно, что параметр потока отказов ω уверенно растет и за 5 рассматриваемый период увеличился в 1,67 раза [7].

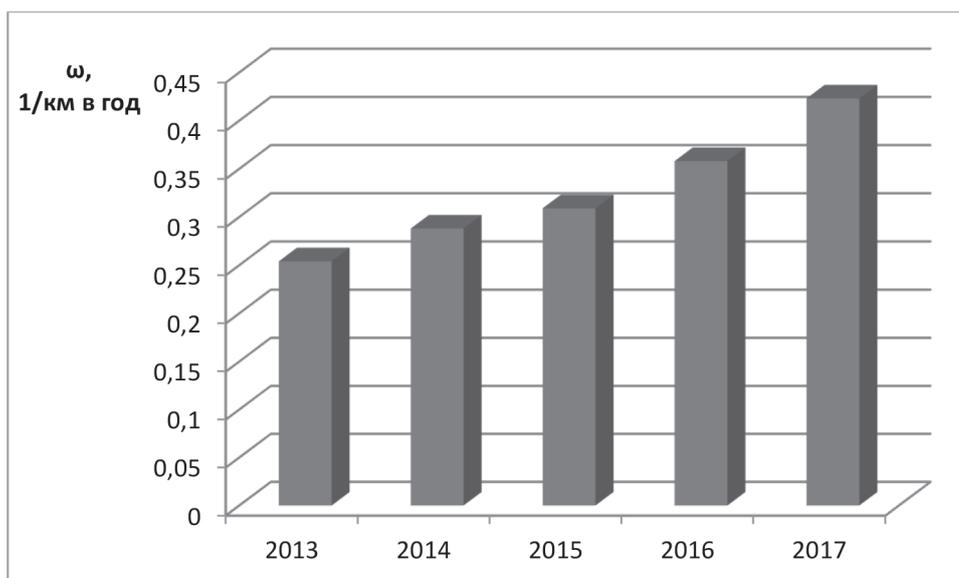


Рис. 2. Параметр потока отказов кабельных линий 6-10 кВ

Одновременно с параметром потока отказов имеет смысл оценить комплексные показатели надежности кабельных линий, такие как коэффициент готовности и / или коэффициент простоя оборудования, поскольку надежность электрических сетей определяется не только интенсивностью отказов, но и сроками восстановления линии.

Общая формула для расчета коэффициента готовности найдется как [8, 9]:

$$K_z = \frac{T - T_{\text{в}}}{T} \quad (1)$$

где T – время работы оборудования до наступления отказа; $T_{\text{в}}$ – среднее время восстановления системы.

Для одного км КЛ время наработки на отказ можно найти как величину обратную параметру потока отказов, ω :

$$T = 1/\omega \text{ (год) или } 8760/\omega \text{ (час).}$$

Таким образом. Формула приобретет вид:

$$K_z = \frac{8760/\omega - T_{\text{в}}}{8760/\omega} \quad (2)$$

Коэффициент простоя оборудования соответственно найдется по известной формуле [8, 9, 10]:

$$K_n = 1 - K_z \quad (3)$$

Для КЛ 6–10 кВ динамика изменений коэффициента готовности и коэффициента простоя КЛ 6 и 10 кВ в рассматриваемом периоде 2013–2017 представлен в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты готовности и простоя по годам рассматриваемого периода

Год	K_z 6-10 кВ	K_n 6-10 кВ	K_z 6 кВ	K_n 6 кВ	K_z 10 кВ	K_n 10 кВ
2013	0,995	0,005	0,996	0,004	0,993	0,007
2014	0,989	0,011	0,991	0,009	0,984	0,016
2015	0,989	0,011	0,991	0,009	0,984	0,016
2016	0,987	0,013	0,990	0,010	0,982	0,018
2017	0,985	0,015	0,989	0,011	0,982	0,018

Проведенное статистическое исследование и предварительные расчеты показали, что коэффициент простоя городских КЛ 6 и 10 кВ стабильно рос на протяжении рассматриваемого периода (рисунок 3).

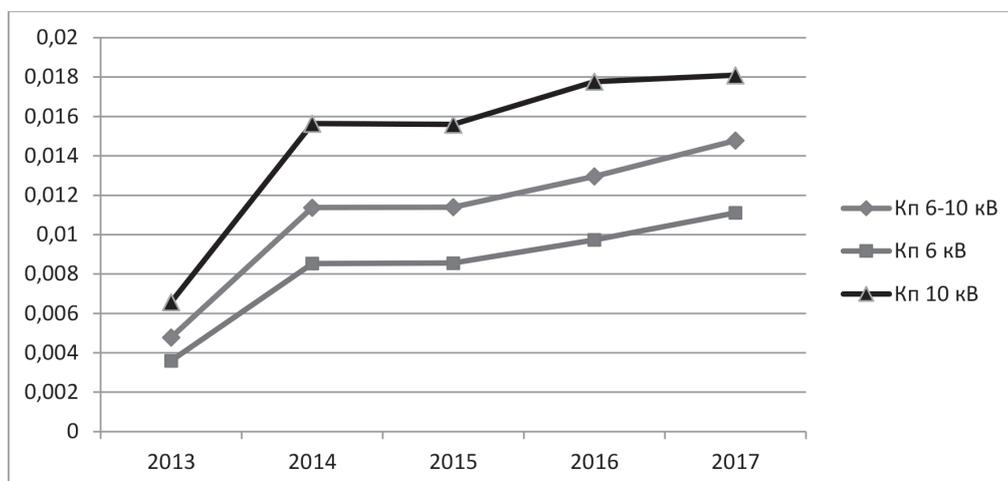


Рис. 3. Коэффициент простоя КЛ 6 и 10 кВ в пересчете на 1 км линии

Все вышесказанное свидетельствует об увеличении аварийности городских электрических сетей. Вместе с тем детальный анализ показал, что коэффициент простоя кабельных линий в значительной степени меняется в зависимости от сезона (рисунки 4 и 5)

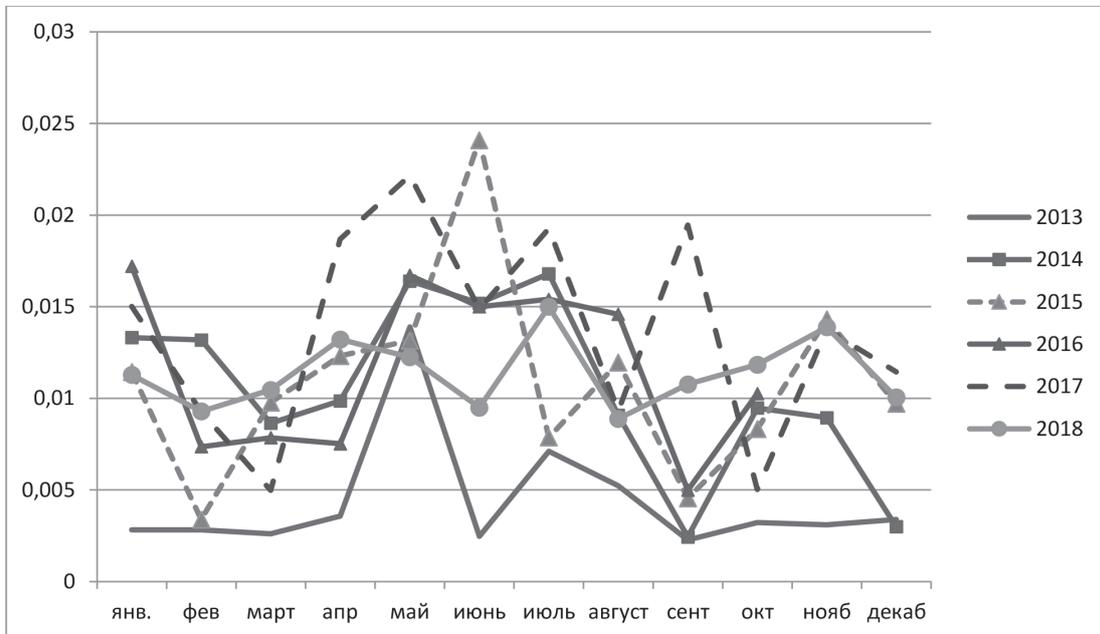


Рис. 4. Сезонные изменения коэффициента простоя КЛ 6–10 кВ

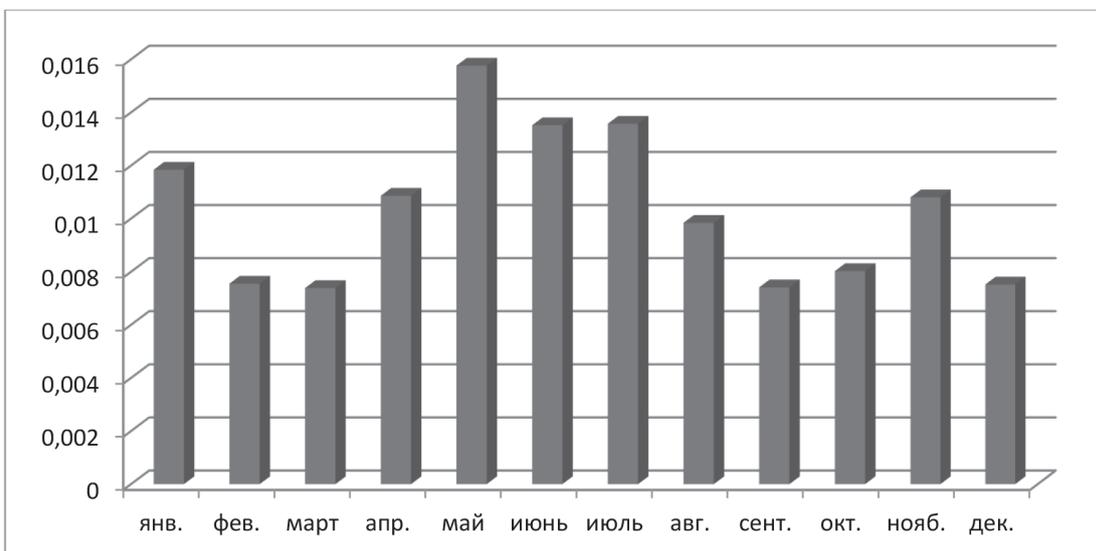


Рис. 5. Средние за 5 лет коэффициенты простоя в КЛ 6–10 кВ

Таким образом, наибольший коэффициент простоя наблюдаются в январе, апреле, мае, июне, июле и ноябре. Эти месяцы лидируют также по количеству отказов и среднему времени восстановления (рисунок 6).

Причем и коэффициент простоя и среднемесячные сроки восстановления КЛ умеренно коррелируют ($R = 0,41$ и $R = 0,43$ соответственно) с количеством произошедших отказов.

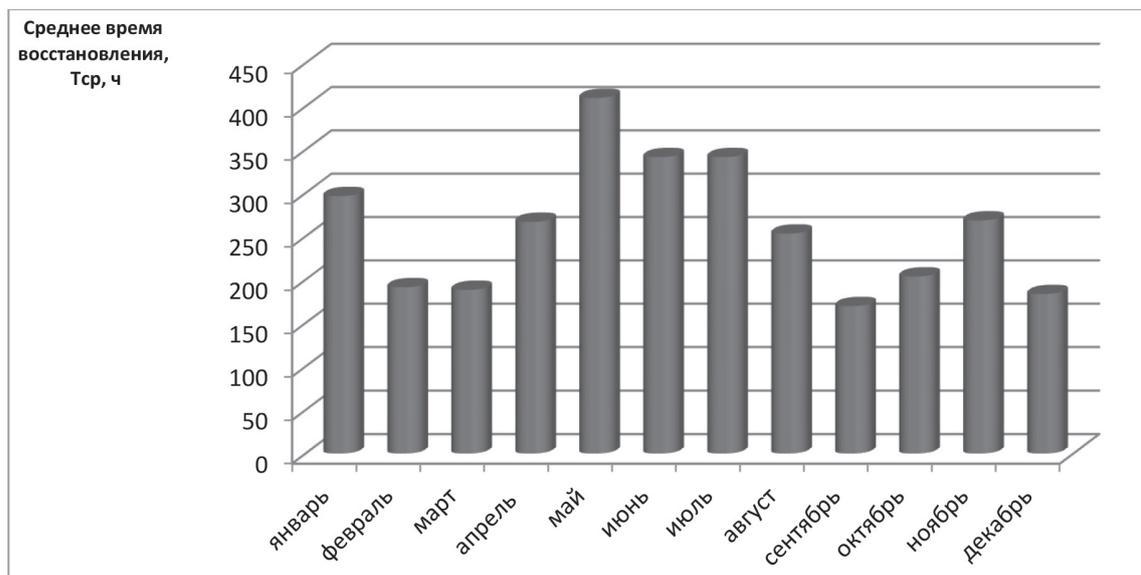


Рис 6. Среднее за 5 лет время восстановления КЛ 6–10 кВ

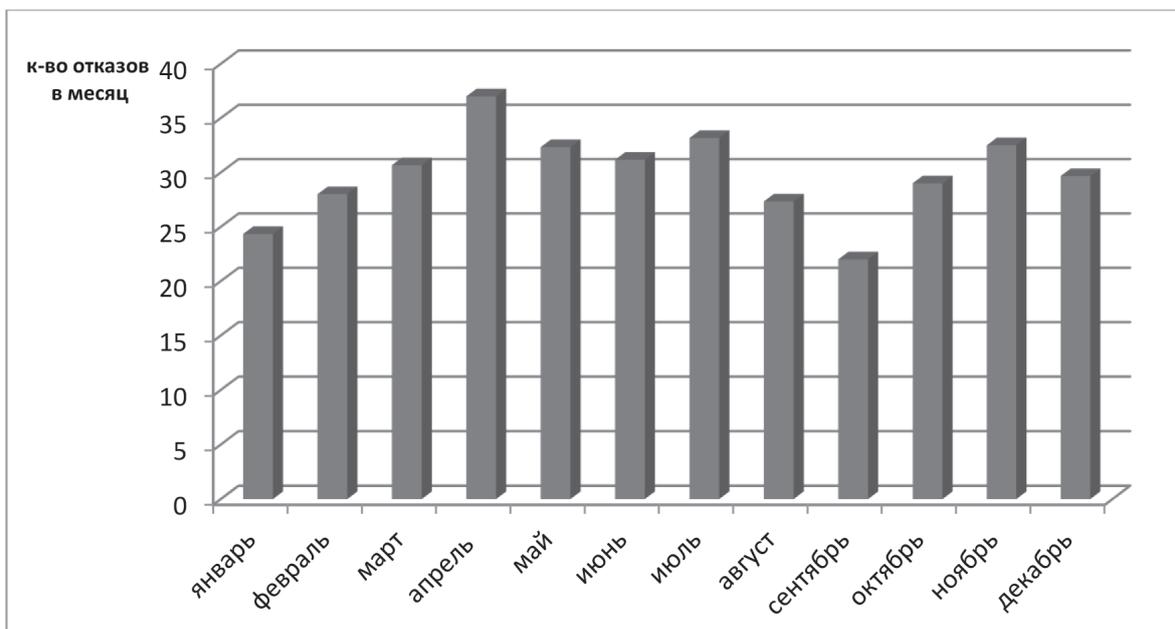


Рис 7. Среднее за 5 лет количество отказов в КЛ 6-10 кВ

Из всего вышеизложенного можно предположить, что с увеличением потока отказов растет очередь заявок на ремонт электрооборудования, что, в свою очередь, негативно сказывается на сроках восстановления кабельных линий, снижая их надежность.

Разумеется, что представленного выше количества данных недостаточно для проведения качественного статистического эксперимента. Поэтому, переходя к пространственно-временной корреляции и используя данные 2013–2017 годов за каждый месяц, можно выявить репрезентативную корреляционную связь между сроками восстановления КЛ и количеством произошедших отказов (рисунок 8).

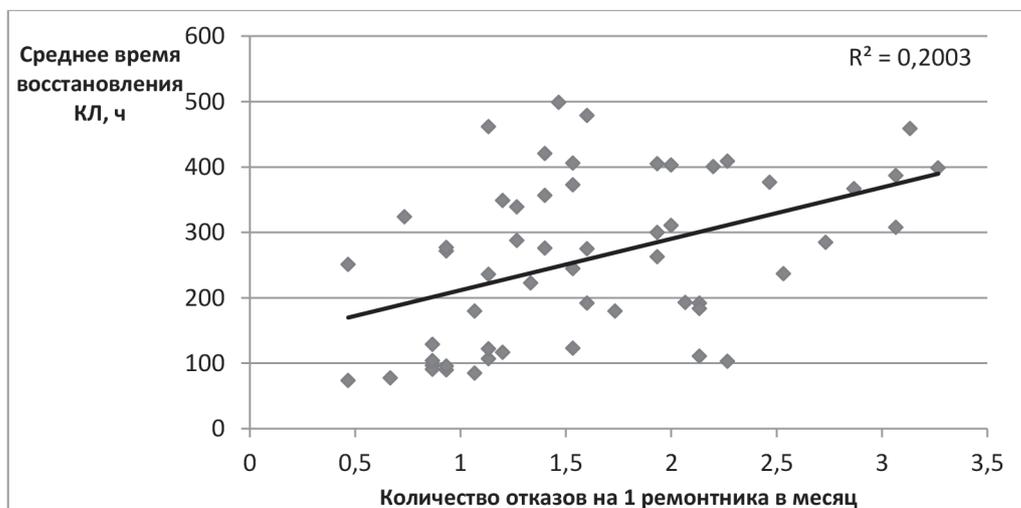


Рис. 8. Влияние потока отказов на среднее время восстановления кабельных линий 6–10 кВ в 2013–2017 гг.

Как видно из рисунка 8, корреляционная связь значима и указывает на то, что увеличение аварийных отказов в КЛ 6–10 кВ в сильной степени влечет за собой увеличение средней продолжительности восстановления линии.

При этом среднее значение коэффициента корреляции указывает на то, что до определенного момента количество отказов КЛ в месяц не влияют на продолжительность восстановления, т. к. не успевает формироваться очередь заявок в ремонт.

Методом последовательного исключения из статистического анализа месяцев с самым наибольшим количеством заявок в ремонт было установлено, что корреляция между количеством отказов и средней продолжительностью восстановления линии очень слабая ($R < 0,25$), если в месяц происходит не более 1,3 аварийных отказов в пересчете на одного работника электроремонтного персонала. При увеличении числа аварийных отказов в месяц корреляционная связь усиливается.

Данный факт указывает на то, что до определенного момента, а именно 1,3 аварийных отказов на работника в месяц, очереди заявок на ремонт не образуется, т. е. штат ремонтного персонала своевременно справляется с поставленной задачей восстановления линии. При увеличении количества аварийных отказов образуется очередь заявок в ремонт и средняя продолжительность восстановления линии заметно увеличивается. Понимание граничной величины потока отказов позволит всесторонне с точки зрения надежности электроснабжения оценить штатную численность электроремонтного персонала.

Принимая во внимание, что в разные месяцы интенсивность отказов сильно различается, необходимо организационными мерами регулировать и численность штата электроремонтного персонала (например, стимулирование выхода в отпуск в месяцы наименьшей аварийности).

Необходимо указать, что время восстановления КЛ включает в себя, кроме времени проведения ремонта еще другие составляющие, такие как время отыскания повреждения, время ожидания ремонта и др. Есть определенный смысл рассмотреть влияние увеличения отказов на каждую из составляющих времени восстановления линии. Полученные нами результаты показали следующую степень корреляции:

- время, прошедшее от момента отказа до начала отыскания места повреждения, $R = 0,3$;
- время ремонта линии, $R = 0,38$;
- время отыскания места отказа, $R = 0,39$;
- время, прошедшее от отыскания места повреждения до начала ремонта, $R = 0,45$.

Таким образом, влияние количества отказов на сроки восстановления КЛ максимально проявляется именно на предремонтной стадии, увеличение длительности которой влечет за собой и значительное увеличение продолжительности и стоимости ремонта [6].

Заключение / Conclusion. Увеличение количества отказов в городских распределительных кабельных линиях однозначно влечет за собой и увеличение сроков восстановления линии.

Для умеренного климата месяцами с наибольшей интенсивностью отказов являются: апрель, май, июнь, июль; с наименьшей – август, сентябрь и октябрь.

Комплексные показатели надежности (коэффициент готовности и коэффициент простоя электрооборудования) в целом по месяцам повторяют картину, как и для интенсивности отказов. Таким образом, необходимо организационными мерами регулировать численность штата электроремонтного персонала в месяцы наибольшей интенсивности отказов.

Граничной величиной влияния интенсивности отказов КЛ является 1,3 отказа в месяц на единицу штата электроремонтного персонала, или 5 отказов в месяц на одну электроремонтную бригаду. При увеличении интенсивности отказов образуется очередь заявок в ремонт, что неизбежно увеличивает время восстановления КЛ, и прежде всего на предремонтной стадии.

ЛИТЕРАТУРА И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ

1. Хорольский, В. Я. Техничко-экономическое обоснование дипломных проектов : учебное пособие / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов, Д. В. Петров. – Ростов-на-Дону : Терра, 2004. – 166 с. – Текст : непосредственный.
2. Кисюк, В. А. Диагностика переключающих устройств без возбуждения силовых трансформаторов. / В. А. Кисюк, Н. Е. Юрцев, Д. В. Петров, В. Н. Сидельников, Д. А. Добриков // Методы и технические средства повышения эффективности использования оборудования в промышленности и сельском хозяйстве. – Ставрополь : АГРУС. – 2016. – С. 69–73. – Текст : непосредственный.
3. Маругин, В. И. К вопросу о вероятностном оценивании состояния распределительных электрических сетей / В. И. Маругин, А. С. Степанов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 3. – С. 12–14. – Текст : непосредственный.
4. Рыбаков, Л. М. Анализ надежности кабельных линий 10 кВ / Л. М. Рыбаков, А. Е. Рылов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2003. – № 3-4. – Казань, 2003. – С. 171–174. – Текст : непосредственный.
5. Чистякова, М. М. Анализ эксплуатационной надежности кабельных линий 6–10 кВ городского района / М. М. Чистякова, М. И. Божков // Современная наука и практика. – 2016. – № 6 (11). – С. 19–24. – Текст : непосредственный.
6. Петров, Д. В. Влияние отсрочек ремонта кабельных линий 6 и 10 кВ на сроки проведения ремонтных работ / Д. В. Петров, В. И. Маругин, С. И. Лещев // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2020. – № 4 (79). – С. 15–21. – Текст : непосредственный.
7. Петров, Д. В. Расчет параметра потока отказов для кабельных линий 6 и 10 кВ города Ставрополя / Д. В. Петров, М. Р. Китаев, Р. Е. Бережной // Электроэнергетика глазами молодежи : материалы IX Международной научно-технической конференции. Ставрополь – 2020. – С. 196–198. – Текст : непосредственный.
8. Хорольский, В. Я. Техничко-экономические расчеты распределительных электрических сетей: учебное пособие / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов, Д. В. Петров. – Москва : Форум. – 2015. – 96 с. – Текст : непосредственный.
9. Хорольский В. Я. Эксплуатация электрооборудования : учебное пособие / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов, В. Н. Шемякин. – Санкт-Петербург : Лань, 2017. – 326 с. – Текст : непосредственный.
10. Анищенко, В. А. Основы надежности систем электроснабжения : учебное пособие / В. А. Анищенко, И. В. Колосова. – Минск : БНТУ, 2007. – 151 с. – Текст : непосредственный.

REFERENCES AND INTERNET RESOURCES

1. Horol'skij, V. Ja. Tehniko-jekonomicheskoe obosnovanie diplomnyh proektov (Feasibility study of diploma projects) / V. Ja. Horol'skij, M. A. Taranov, D. V. Petrov. – Rostov-na-Donu : Terra, 2004. – 166 s.
2. Kisjuk, V. A. Diagnostika pereklyuchajushhih ustrojstv bez возбуждения силовых трансформаторов (Diagnostics of switching devices without excitation of power transformers) / V. A. Kisjuk, N. E. Jurcev, D. V. Petrov, V. N. Sidel'nikov, D. A. Dobrikov // Metody i tehicheskie sredstva povyshenija jeffektivnosti ispol'zovanija oborudovanija v promyshlennosti i sel'skom hozjajstve. – Stavropol' : AGRUS, 2016. – S. 69–73.
3. Marugin, V. I. K voprosu o verojatnostnom ocenivanii sostojanija raspredelitel'nyh jelektricheskikh setej (On the question of probabilistic assessment of the state of distribution electrical networks) / V. I. Marugin, A. S. Stepanov // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jeлектromehanika. – 2014. – No 3. – S. 12–14.
4. Rybakov, L. M. Analiz nadezhnosti kabel'nyh linij 10 kV (Analysis of the reliability of cable lines 10 kV) / L. M. Rybakov, A. E. Rylov // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki. – 2003. – No 3-4. – S. 171–174.
5. Chistjakova, M. M. Analiz jekspluatacionnoj nadezhnosti kabel'nyh linij 6–10 kV gorodskogo rajona (Analysis of the operational reliability of 6–10 kV cable lines in the urban area) / M. M. Chistjakova, M. I. Bozhkov // Sovremennaja nauka i praktika. – 2016. – No 6 (11). – S. 19–24.
6. Petrov, D. V. Vlijanie otsrochek remonta kabel'nyh linij 6 i 10 kV na sroki provedenija remontnyh rabot (Influence of delays in repair of 6 and 10 kV cable lines on the timing of repair work) / D. V. Petrov, V. I. Marugin, S. I. Leshhev // Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta. – 2020. – No 4 (79). – S. 15–21.
7. Petrov, D. V. Raschet parametra potoka otkazov dlja kabel'nyh linij 6 i 10 kV goroda Stavropolja (Calculation of the parameter of the flow of failures for cable lines 6 and 10 kV of the city of Stavropol) / D. V. Petrov, M. R. Kitaev, R. E. Berezhnoj // Jeлектrojenergetika glazami molodezhi : materialy IX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. – Stavropol', 2020. – S. 196–198.
8. Horol'skij, V. Ja. Tehniko-jekonomicheskie raschety raspredelitel'nyh jelektricheskikh setej (Technical and economic calculations of electrical distribution networks) : uchebnoe posobie / V. Ja. Horol'skij, M. A. Taranov, D. V. Petrov. – Moskva : Forum, 2015. – 96 s.
9. Horol'skij, V. Ja. Jekspluatacija jelektrooborudovanija (Operation of electrical equipment) : uchebnoe posobie / V. Ja. Horol'skij, M. A. Taranov, V. N. Shemjakin. – Sankt-Peterburg : Lan', 2017. – 326 s.
10. Anishhenko, V. A. Osnovy nadezhnosti sistem jelektrosnabzhenija (Fundamentals of reliability of power supply systems) : uchebnoe posobie / V. A. Anishhenko, I. V. Kolosova. – Minsk : BNTU, 2007. – 151 s.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Денис Васильевич, кандидат экономических наук, доцент кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения, СКФУ. E-mail: petrov-danc@mail.ru

Маругин Валерий Игоревич, старший преподаватель кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения, СКФУ. E-mail: vmarugin@ncfu.ru

Петров Антон Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения, СКФУ. E-mail: ap-17@bk.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Denis Petrov, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department Automated Energy Systems and Power Supply, NCFU. E-mail: petrov-danc@mail.ru

Valery Marugin, Senior Lecturer, Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, NCFU. E-mail: vmarugin@ncfu.ru

Anton Petrov, Candidate of Engineering Science, Associate Professor of the Department Automated Energy Systems and Power Supply, NCFU. E-mail: ap-17@bk.ru