DOI: 10.71841/EP.elst.2025.1124.3.07

Моделирование организации аварийно-восстановительных работ в распределительных электрических сетях в результате воздействия стихийных явлений

- **Юндин К. М.**[1], канд. техн. наук, Донской государственный технический университет; ПАО "Россети Юг", Ростов–на–Дону
- **Исупова А. М.**, канд. техн. наук, Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь
- **Хорольский В. Я.**, доктор техн. наук, Инженерный институт Северо–Кавказского федерального университета, Ставрополь
- **Шарипов И. К.**, канд. техн. наук, Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь
- **Руденко Н. Б.**, канд. техн. наук, Азово–Черноморский инженерный институт Донского ГАУ, Ростовская обл., г. Зерноград

Рукопись статьи получена 17.09.2024, утверждена редколлегией в печать 19.02.2025.

Сформулирована и решена оптимизационная задача по определению дополнительно привлекаемых бригад для устранения массовых повреждений в распределительных сетях, возникших в результате воздействия стихийных явлений. Решалась задача методами теории массового обслуживания. Входящий поток заявок на обслуживание рассматривался как неординарный и нестационарный, что является отличительной особенностью предлагаемого подхода. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для расчёта двух показателей, входящих в результирующую целевую функцию, – вероятность выполнения поступившее количество заявок за время, не более заданного, и коэффициент загрузки бригад. На конкретном примере показана возможность применения предлагаемого методического подхода.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, теория массового обслуживания, оптимизационная задача.

Массовые повреждения распределительных электрических сетей – не частые события, однако они могут приводить к длительным перерывам в электроснабжении. С целью сокращения времени ликвидации повреждений на электросетевых предприятиях практикуется система привлечения ремонтных бригад из других регионов. При решении вопроса определения необходимого и достаточного количества дополнительно привлекаемых бригад в ряде научных публикаций [1 – 4] предлагается использовать математический аппарат теории массового обслуживания, базирующийся на предположении, что входящий поток заявок является простейшим. Однако при массовых повреждениях в электрических сетях входящий поток заявок уже не будет ординарным и стационарным, поэтому использование известных математических моделей, ориентированных на Пуассоновский поток требований, для описания таких процессов не правомерно.

Нами предлагается рассмотреть процесс привлечения дополнительных ремонтных бригад для ликвидации массовых повреждений в электрических сетях с позиций теории массового обслуживания в следующей постановке.

Электросетевая организация, эксплуатирующая электрические сети представляет собой многоканальную систему массового обслуживания (СМО) с неограниченной очередью, в которую в штатном режиме поступает простейший поток заявок на обслуживание. Система функционирует в установившемся режиме, при этом интенсивность нагрузки каналов меньше единицы, имеющееся число каналов и интенсивность обслуживания заявок позволяют системе справляться с входящим потоком требований, очередь не растёт до бесконечности.

В случае массовых повреждений к текущему потоку заявок добавляется групповая заявка, обусловленная практически одновременным повреждением определённого количества электросетевых элементов. Групповая заявка приводит к нарушению установившегося режима функционирования

[1] Юндин Константин Михайлович: ukm_61@rambler.ru

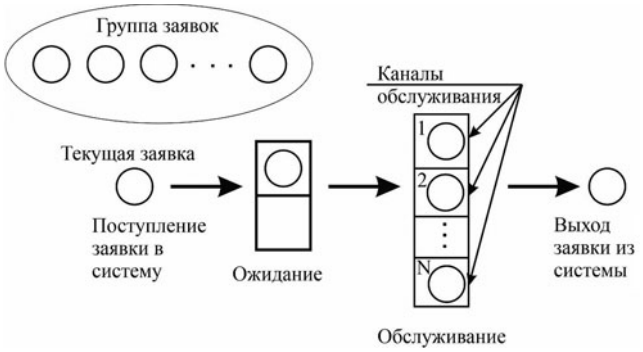


Рис. 1. Схема поступления заявок при возникновении массовых повреждений

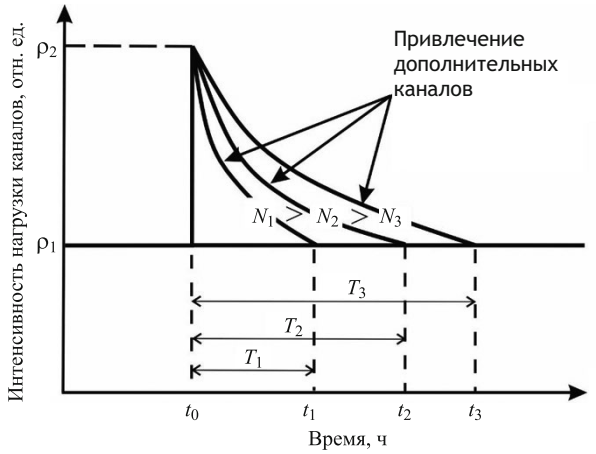


Рис. 2. Влияние количества дополнительно привлекаемых каналов на продолжительность переходного процесса

рассматриваемой СМО, поскольку нагрузка каналов резко возрастает. Очевидно, что при этом увеличивается длина очереди и время пребывания заявки в системе, т.е. длительность перерывов в электроснабжении потребителей. Схема этого процесса поясняется на рис. 1.

Для того, чтобы система вернулась в установившийся режим, необходимо увеличить число каналов обслуживания – привлечь дополнительные ремонтные бригады. Количество привлекаемых каналов обслуживания влияет на длительность переходного процесса. Условно эта зависимость показана на рис. 2.

Интенсивность нагрузки каналов ρ_1 соответствует установившемуся режиму, когда текущие неисправности устраняются собственным персоналом организации. При массовых повреждениях интенсивность нагрузки каналов возрастает до значения ρ_2 и привлекаемые дополнительные бригады направляются на выполнение заявок, возникших в результате массовых повреждений. Очевидно, что с ростом количества каналов обслуживания ($N_1 > N_2 > N_3$) время устранения массовых повреждений будет сокращаться ($T_1 < T_2 < T_3$). Однако при этом коэффициент занятости каналов, представляющий собой отношение времени, когда канал непосредственно занят обслуживанием заявки к общему времени устранения массовых повреждений снижается.

Таким образом, показателями эффективности рассматриваемой системы выступают два противоречивых критерия – вероятность того, что вся группа заявок, образовавшихся в результате массовых повреждений, будет устранена за время, не больше заданного T, и коэффициент занятости дополнительно привлекаемых каналов. Такая задача относится к категории двухкритериальных, оптимизируемым параметром в данном случае является число дополнительно привлекаемых бригад. При этом для первого критерия характерна возрастающая зависимость от оптимизируемого параметра, а для второго критерия – убывающая.

Поскольку, как отмечено ранее, в случае возникновения массовых повреждений входящий поток заявок не может считаться простейшим, мы не вправе использовать формулы Эрланга для расчёта критериев эффективности СМО. Поэтому возникает задача, связанная с необходимостью установления функциональных зависимостей между оптимизируемым параметром и рассматриваемыми критериями эффективности.

Известно, что время обслуживания одной заявки – непрерывная случайная величина, имеющая экспоненциальное распределение. Тогда для определения вероятности того, что заявка будет обслужена одним каналом за время, не более заданного времени T, можно воспользоваться выражением

$$P(0 < t < T) = 1 - e^{-\frac{T}{t_{ср}}}, \qquad (1)$$

где $t_{ср}$ – среднее время обслуживания одной заявки, ч.

В общем случае число дополнительно привлекаемых бригад для обслуживания группы из M заявок может изменяться в диапазоне $1 \le N \le M$.

Если дополнительно привлекается число бригад $N = 1$, то все заявки будут обслуживаться одним каналом, и тогда вероятность выполнить все заявки за время, не более заданного T, составит

$$P(0 < t < T) = 1 - e^{-\frac{T}{M\,t_{ср}}}. \qquad (2)$$

Если дополнительно привлекается число бригад $N = M$, то каждый канал будет обслуживать по одной заявке, и все заявки будут обслужены, когда освободятся все каналы. Тогда, для определения вероятности выполнить все заявки за время, не более заданного T, используя формулу умножения вероятностей, можно записать выражение

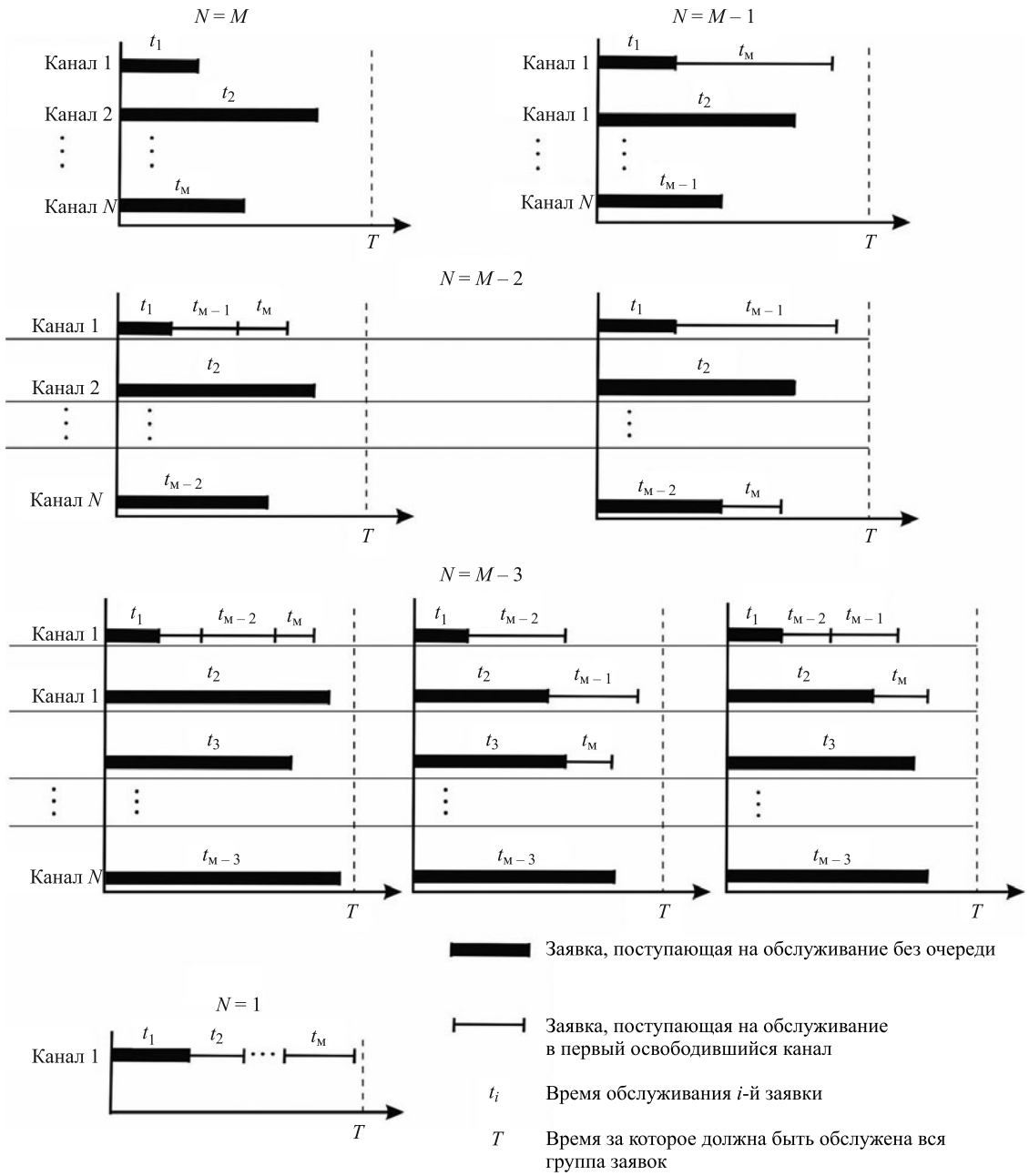


Рис. 3. Некоторые состояния системы при количестве заявок *M* и числе каналов *N*

$$P(0 < t < T) = \left(1 - e^{-\frac{T}{t_{ср}}}\right)^{M}. \qquad (3)$$

Вероятность выполнить все заявки за время, не более заданного T, при количестве дополнительно привлекаемых каналов

$$N = M - k,$$

где $k = 1, 2, 3, \ldots, (M - 1)$ будет определяться на основании формул (2) и (3).

Например, для состояния системы, когда число каналов на единицу меньше числа заявок ($N = M - 1$), тот из каналов, который освободится первым, возьмёт на обслуживание ещё одну заявку. Таким образом, один канал последовательно обслужит две заявки, а $M - 2$ канала обслужат одну заявку. Вероятность выполнить все заявки за время, не более заданного T, в такой ситуации будет определяться по выражению

$$P(0 < t < T) = \left(1 - e^{-\frac{T}{t_{ср}}}\right)^{M-2} \left(1 - e^{-\frac{T}{2t_{ср}}}\right).$$

Для состояния системы, когда $N = M - 2$, две заявки будут дополнительно распределены между каналами. В такой ситуации возможны два случая:

один канал последовательно обслуживает три заявки, а $M - 3$ канала – по одной заявке. Вероят-

ность выполнить все заявки за время, не более заданного времени T, составит

$$P(0 < t < T) = \left(1 - e^{-\frac{T}{t_{ср}}}\right)^{M-3} \left(1 - e^{-\frac{T}{3t_{ср}}}\right);$$

два канала последовательно обслуживают две заявка, а $M - 4$ канала – по одной заявке. Вероятность выполнить все заявки за время, не более заданного T, будет равна

$$P(0 < t < T) = \left(1 - e^{-\frac{T}{t_{ср}}}\right)^{M-4} \left(1 - e^{-\frac{T}{2t_{ср}}}\right)^{2.}$$

Некоторые состояния системы при количестве заявок M и числе каналов N показаны на рис. 3.

Среднее значение коэффициента загрузки каналов для каждого из рассматриваемых состояний может быть определено из выражения

$$\bar{k}_З = \frac{\sum_{i=1}^{N} k_{Зi}}{N} = \frac{Mt_{ср}}{NT},$$

где $k_{Зi}$ – коэффициент загрузки i-го канала.

Число состояний, в которых может оказаться система, будет зависеть от количества заявок в группе и количества дополнительно привлекаемых каналов. Поэтому расчёт вероятностей выполнить все заявки за время, не более заданного T, и значений среднего коэффициента загрузки каналов при известном количестве заявок M и различном числе дополнительных каналов сводится к перебору различных состояний системы, которое конечно для каждого конкретного значения M и T.

Поскольку для вероятности выполнить все заявки за время, не более заданного T, характерна возрастающая зависимость от количества дополнительно привлекаемых каналов, а для среднего коэффициента загрузки каналов – убывающая, то очевидно, что рассматриваемые зависимости при некотором значении N будут иметь точку пересечения. Именно это значение N и следует считать оптимальным, так как в точке пересечения оба критерия ***одновременно*** будут иметь максимальные значения.

Также оптимальное количество дополнительно привлекаемых каналов может быть найдено и аналитически – оптимальное значение параметра будет соответствовать варианту, когда разность между критериями эффективности примет нулевое значение.

Для расчёта вероятностей выполнить все заявки за время, не более заданного T, и среднего коэффициента загрузки каналов в зависимости от количества дополнительно привлекаемых бригад при известном количестве заявок, возникших при массовых повреждениях, и среднем времени обслуживания одной заявки нами был разработан программный продукт [5]. Результаты расчёта для некоторых частных случаев приведены в таблице.

Выбор оптимального количества дополнительно привлекаемых бригад, как было упомянуто ранее, может быть найден путём сопоставления двух показателей – вероятности выполнить все заявки за время, не более заданного T, и коэффициента загрузки бригад. С этой целью на рис. 4 построены кривые изменения анализируемых показателей в зависимости от количества дополнительно привлекаемых бригад.

Используя приведённые графические зависимости рассмотрим динамику изменения этих пока-

Расчёт показателей СМО

Количество дополнительных бригад	Количество групповых заявок M, которые должны быть выполнены за $T = 24$ ч		
	$M = 30$	$M = 20$	$M = 10$
1	0,234 / 1	0,330 / 1	0,551 / 1
2	0,241 / 1	0,344 / 1	0,589 / 0,63
3	0,248 / 1	0,359 / 0,83	0,632 / 0,42
4	0,256 / 0,94	0,375 / 0,63	0,680 / 0,31
5	0,265 / 0,75	0,393 / 0,50	0,735 / 0,25
6	0,273 / 0,63	0,413 / 0,42	0,797 / 0,21
7	0,283 / 0,54	0,434 / 0,36	0,863 / 0,18
8	0,293 / 0,47	0,458 / 0,31	0,928 / 0,16
9	0,304 / 0,42	0,485 / 0,28	0,979 / 0,14
10	0,316 / 0,38	0,515 / 0,25	0,997 / 0,13
11	0,329 / 0,34	0,549 / 0,23	
12	0,342 / 0,31	0,587 / 0,21	
13	0,357 / 0,29	0,630 / 0,19	
14	0,374 / 0,27	0,678 / 0,18	
15	0,392 / 0,25	0,733 / 0,17	
16	0,411 / 0,23	0,794 / 0,16	
17	0,433 / 0,22	0,860 / 0,15	
18	0,457 / 0,21	0,925 / 0,14	
19	0,484 / 0,20	0,976 / 0,13	
20	0,513 / 0,19	0,993 / 0,13	
21	0,547 / 0,18		
22	0,585 / 0,17		
23	0,627 / 0,16		
24	0,676 / 0,16		
25	0,730 / 0,15		
26	0,791 / 0,14		
27	0,857 / 0,14		
28	0,922 / 0,13		
29	0,973 / 0,13		
30	0,990 / 0,13		

Примечание. Числитель – вероятность выполнения, знаменатель – коэффициент занятости бригад.

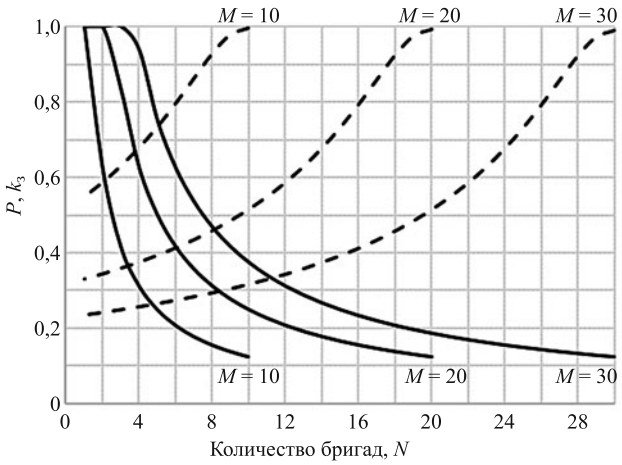


Рис. 4. Зависимость вероятности обслуживания (пунктир) и коэффициента занятости (сплошная линия) от числа ремонтных бригад

зателей при варьировании числом ремонтных бригад для случая, когда количество групповых заявок в системе $M = 10$.

Как видно из рис. 4, при количестве дополнительно привлекаемых бригад $N = 10$, вероятность выполнить все заявки за время, не более заданного $T = 24$ ч, достаточно высока ($P = 0{,}997$). Однако коэффициент занятости бригад в этом случае составляет 0,13. Это значит, что 87% времени бригады простаивают. Разница между показателями P и $k_з$ составляет 0,867. Имеет место значительное расхождение в показателях, следовательно, вариант не является оптимальным.

Уменьшим количество дополнительно привлекаемых бригад до $N = 6$. Разница между показателями уменьшилась, как следует из рис. 4 в этом случае $P = 0{,}797$, а $k_з = 0{,}21$, разница в показателях составила 0,587. При этом коэффициент занятости увеличился почти в 2 раза при незначительном снижении вероятности обслуживания.

Проследив динамику изменения показателей, можно сделать вывод, что оптимальное количество дополнительно привлекаемых ремонтных бригад соответствует точке пересечения кривых, характеризующих изменение вероятности обслуживания и коэффициента занятости бригад. Так, для рассматриваемого случая оптимальным следует признать вариант привлечения двух бригад, при этом $P \approx k_з \approx 0{,}6$.

Анализ полученных кривых также позволяет сделать вывод о том, что при уменьшении числа каналов и потока заявок вероятность обслуживания и коэффициент занятости увеличиваются. Особенно это характерно при небольших значениях N и M.

Соблюдение этических норм

- Все авторы подтверждают, что они не связаны с какой-либо организацией или юридическим лицом, имеющим какой-либо финансовый или нефинансовый интерес к предмету или материалам, обсуждаемым в этой статье.

Список литературы

1. *Хорольский, В. Я* Определение оптимального числа ремонтных бригад для устранения массовых повреждений в электрических сетях / В. Я. Хорольский, В. Н. Шемякин, С. А. Кравченко // Вестник АПК Ставрополья. – 2013. – № 2 (10). – С. 135 – 137.
2. *Хорольский, В. Я.* Прикладные методы для решения задач электроэнергетики и агроинженерии / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов, В. Н. Шемякин, С. В. Аникуев. – М.: ИНФРА-М; ФОРУМ, 2015. – 176 с.
3. *Ефанов, А. В.* Исследование переходных процессов в системах массового обслуживания при изменении параметра потока отказов / А. В. Ефанов, С. С. Ястребов, А. Г. Букреев, С. В. Оськин // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. Материалы XVII международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 159 – 164.
4. *Ефанов, А. В.* Алгоритм определения численности персонала для ликвидации массовых отказов в сельских электросетях / А. В. Ефанов, С. В. Оськин, С. С. Ястребов, В. А. Ярош, А. Г. Букреев // Сельский механизатор. – 2019. – № 11. – С. 31 – 33.
5. *Исупова, А. М.* Расчет вероятности выполнения работ и коэффициента загрузки ремонтных бригад при устранении массовых повреждений в электрических сетях / А. М. Исупова, Н. Б. Руденко, В. Я. Хорольский, А. И. Самарцев // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024614194, 21.02.2024: заявка № 2024612626 от 09.02.2024.