

УДК 632.45

UDC 632.45

**НАДЕЖНОСТЬ РАДИАЛЬНОЙ СХЕМЫ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С СЕКЦИО-  
НИРОВАНИЕМ**

**RELIABILITY OF RADIAL SUPPLY GRIDS  
WITH SECTIONALIZATION**

Воротников Игорь Николаевич,  
к.т.н., доцент

Vorotnikov Igor Nikolaevich  
Cand.Tech.Sci., associate professor

Данченко Игорь Васильевич  
инженер  
*Ставропольский государственный аграрный уни-  
верситет, Ставрополь, Россия*

Danchenko Igor Vasilievich  
engineer  
*Stavropol State Agrarian University, Krasnodar, Rus-  
sia*

В статье рассмотрены вопросы надежности элек-  
трических распределительных сетей в сельском  
хозяйстве, а также разработана математическая  
модель надежности радиальной схемы распреде-  
лительной сети

The questions of reliability of distribution of power  
grids are considered in the article and the mathematical  
model of reliability of radial supply grids is developed

Ключевые слова: НАДЕЖНОСТЬ, ЭЛЕКТРИЧЕ-  
СКИЕ СЕТИ, МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАДЕЖ-  
НОСТИ

Keywords: RELIABILITY, POWER GRIDS, RELI-  
ABILITY CALCULATION

Известно, что среди существующих систем, обеспечивающих эффек-  
тивное функционирования объектов агропромышленного комплекса, ве-  
дущая роль принадлежит системам электроснабжения. Главным принци-  
пом их построения является использования в качестве основного источни-  
ка питания распределительной электрической сети, находящейся на балан-  
се муниципального предприятия электрических сетей (ПЭС).

Имеется понятие распределительной сети и характерные особенно-  
сти её построения в населенных пунктах сельского типа.

Согласно распределительной электрической сетью принято считать  
такую сеть, в которой энергия от источника питания (ИП) (питающего  
центра) непосредственно подводится к отдельным трансформаторным  
подстанциям (ТП), снабжающих электроэнергией потребителей (П). Таким  
образом, распределительная сеть представляет собой совокупность линий  
электропередачи (ЛЭП) (6 – 10 кВ и 0,4 кВ) и понижающих трансформа-  
торных подстанций.

Отличие распределительной сети от питательной состоит в том, что  
построение последней предполагает предварительную подачу электро-

энергии от питающего центра на распределительные пункты (РП), от которых уже отходит собственно распределительная сеть.

Питательная сеть устраивается в тех случаях, когда ИП расположен на значительном расстоянии от ТП или если необходимо уменьшить число дорогостоящих ячеек с выключателями нагрузки и прочей аппаратурой высокого напряжения на питающем центре или, наконец, если токопонижающих ТП, присоединяемых к одной ЛЭП 6-10 кВ, больше, чем это допускается из условий удобства эксплуатации.

Питательная сеть, как правило, используется в городских населённых пунктах. Для электроснабжения потребителей сельскохозяйственного назначения в качестве основного источника питания используется распределительная сеть. В связи с этим, предметом диссертационных исследований является распределительная сеть.

Основными отличительными особенностями последней являются:

- распределительная схема построения распределительной сети;
- использование в качестве ЛЭП воздушных линий (ВЛ);
- применение комплектных трансформаторных подстанций (КТП) с воздушным вводом и воздушными отходящими линиями 0,4 кВ.

Отмеченные особенности и, в первую очередь, вторая обуславливает невысокую надежность электроснабжения потребителей, получающих энергию через сельскую распределительную сеть.

Надёжность функционирования сельскохозяйственной распределительной сети с радиальной топологией в силу ряда объективных причин невысока. Для её повышения применяются следующие пути: секционирование питающей линии 6-10кВ и резервирование (кольцевание) ЛЭП.

В целях проведения количественной оценки выигрыша от применения первого способа необходимо разработать математическую модель надёжности радиальной распределительной сети с секционированием.

Радиальная схема распределительной электрической сети с секционированием может быть представлена в виде (рисунок 1).

Детализируем данную схему для решения вопроса оценки надежности электроснабжения конкретного сельскохозяйственного потребителя (рисунок 2). Для повышения надежности сети путем локализации повреждений на основном фидере 10(6) кВ установлены линейные разъединители ( $P_{Л1} \dots P_{Л(N-1)}$ ). При устойчивом повреждении любого из участков ВЛ-10(6) кВ ( $L_{10} \dots L_{1(N-1)}$ ) срабатывает головной выключатель. После отыскания места повреждения отключается нужный разъединитель, и питание остальной части схемы восстанавливается.

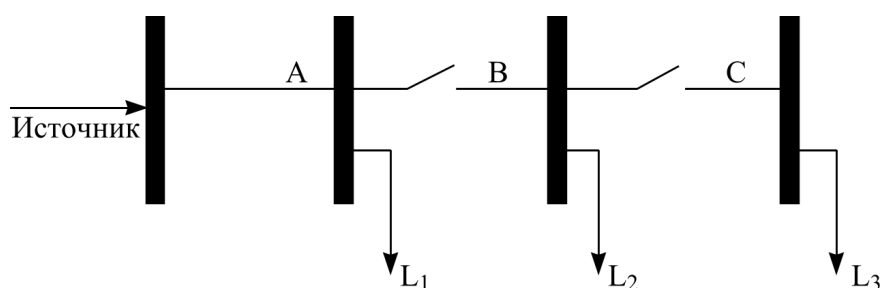


Рисунок 1 – Структурная схема радиальной сети с секционированием

Определим вероятность безотказной работы схемы (рисунок 2). Для этого представим ее в более обобщенном виде совокупности узлов нагрузки ( $Y_i$ ), включающих оборудование ТП и отходящие низковольтные питающие линии ( $l$ ), участков ВЛ-10(6) кВ ( $L_{li}$ ) и разъединителей: подстанционных ( $P_{ТП}$ ) и линейных ( $P_{Л}$ ). Укрупненная схема представлена на рисунке 3. Как и в предыдущем подразделе расчет надежности электроснабжения потребителя начнем с расчета вероятности бесперебойной работы сети применительно к произвольному узлу нагрузки  $Y_k$ . Для этого используем уже известный метод минимальных сечений.

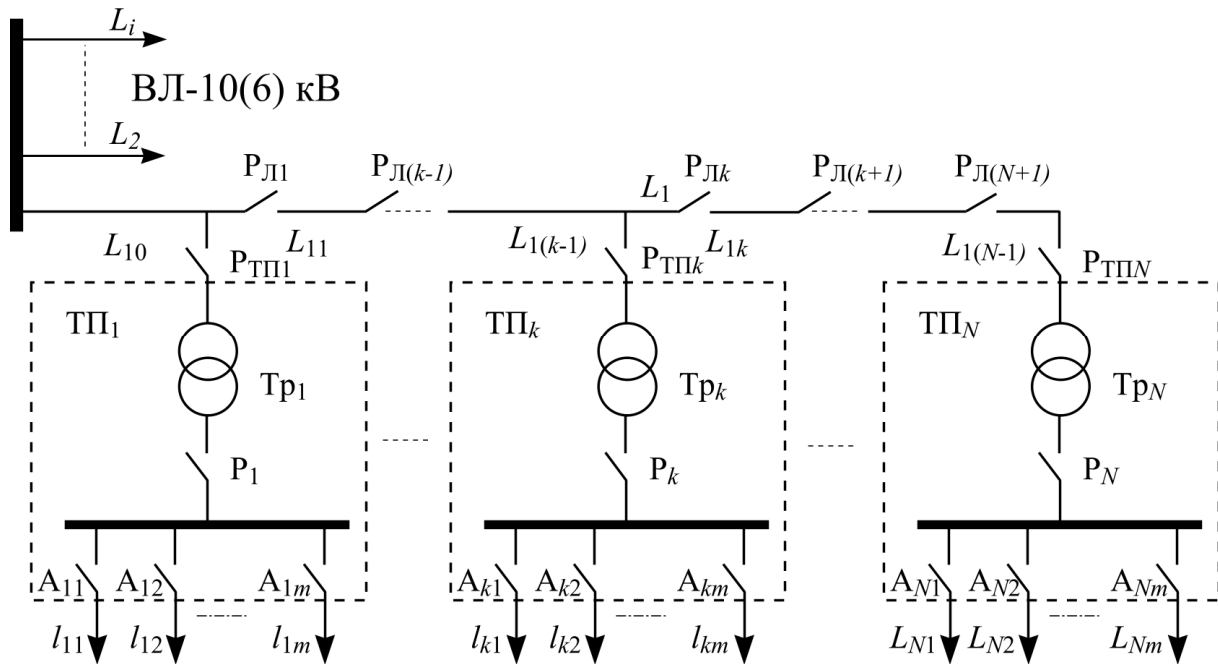


Рисунок 2 – Электрическая схема радиальной схемы распределительной сети с секционированием фидера 10(6) кВ

В общем случае, минимальных сечений может быть несколько. Логическая схема системы составляется таким образом, чтобы все элементы каждого минимального сечения были соединены друг с другом параллельно, а все минимальные сечения – последовательно. Очевидно, система с параллельным соединением элементов имеет только одно минимальное сечение, включающее все ее элементы (восстановление любого восстановит работоспособность системы). В системе с последовательным соединением элементов число минимальных путей совпадает с числом элементов.

Определим набор неработоспособных элементов схемы, отказ которых приводит к отказу системы, а восстановление работоспособности любого из них – к восстановлению ее работоспособности для схемы, изображенной на рисунке 3. При этом будем полагать вероятность одновременного нарушения работоспособности двух и более разъединителей любого назначения ничтожной.

Так для нарушения электроснабжения узла нагрузки  $U_k$  достаточно выхода из строя любого участка ВЛ-10(6) кВ  $L_{10} \dots L_{k-1}$ ; отказа в срабатывании 1-го типа любого из разъединителей  $P_{ТП1} \dots P_{ТПk}$ , т.к. в этом случае

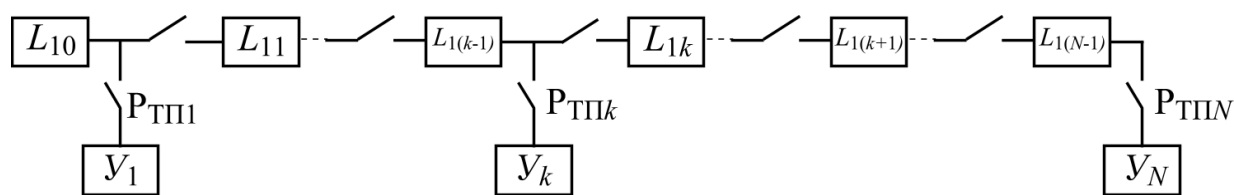


Рисунок 3 – Укрупненная схема радиальной электрической сети с секционированием

для восстановления работоспособности каждого потребуется снятие напряжения с участка ВЛ-10(6) кВ  $L_{1i} \dots L_{1k-1}$  (здесь  $i$  – номер вышедшего из строя подстанционного разъединителя  $P_{ТПi}$ ); отказа в срабатывании 1-го типа любого из разъединителей  $P_{Л1} \dots P_{Лk}$ , т.к. в этом случае для восстановления работоспособности каждого потребуется снятие напряжения с участка ВЛ-10(6) кВ  $L_{1i-1} \dots L_{1N-1}$  (здесь  $i \leq k$  – номер вышедшего из строя линейного разъединителя  $P_{Ли}$ ); отказа непосредственно рассматриваемого узла нагрузки  $U_k$ , следовательно, каждый из перечисленных элементов представляет собой минимальное сечение. Кроме того, к нарушению электроснабжения узла нагрузки  $U_k$  приведет повреждение участка питающего фидера  $L_{1k}$  при одновременном отказе в срабатывании линейного разъединителя  $P_{Лk}$  2-го типа; отказ любого из узлов нагрузки  $U_1 \dots U_{k-1}$  при одновременном отказе в срабатывании одноименного разъединителя  $P_{ТПi}$  2-го типа, следовательно, каждая пара этих элементов также составляет минимальное сечение.

В соответствии с рассмотренными условиями построим логическую схему по методу минимальных сечений (рисунок 4).

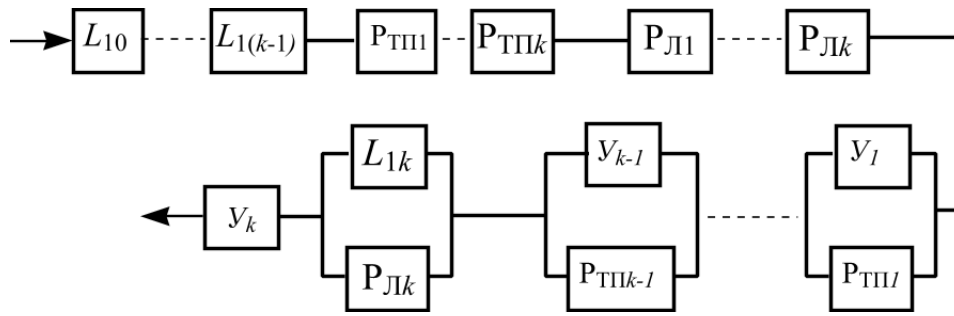


Рисунок 4 – Логическая схема надежности радиальной распределительной сети с секционированием, построенная по методу минимальных сечений

Для полученной схемы составляем функцию алгебры логики  $A_2$ . по общим правилам расчета вероятности безотказной работы, но вместо символов вероятностей безотказной работы элементов  $p_i$  и системы  $P_2$  используем символы события (сохранения работоспособности элемента и системы  $A_2$ ).

“Безотказная работа” логической системы (рисунок 4) заключается в “безотказной работе” всех последовательных участков, а “отказ” каждого из них – в одновременном “отказе” всех параллельно включенных элементов. Схема на рисунке 4 соответствует формулировке: система откажет, если откажут элементы  $L_{10} \dots$  и  $\dots L_{1k-1}$ ,  $P_{ТП1} \dots$  и  $\dots P_{ТПk}$ ,  $P_{Л1} \dots$  и  $\dots P_{Лk}$  и  $Y_k$ , или  $Y_1$  и  $P_{ТП1}, \dots$ , или  $Y_{k-1}$  и  $P_{ТПk-1}$ , или  $L_{1k}$  и  $P_{Лk}$ . Функция алгебры логики в этом случае запишется.

$$A_2 = [1 - (1 - a_{L_{10}} \dots a_{L_{1k-1}} a_{P_{ТП1}} \dots a_{P_{ТПk}} a_{P_{Л1}} \dots a_{P_{Лk}} a_{Y_k})] \cdot [1 - (1 - a'_{P_{ТП1}})(1 - a_{Y_1})] \times \dots \times [1 - (1 - a'_{P_{ТПk-1}})(1 - a_{Y_{k-1}})] \cdot [1 - (1 - a_{L_{1k}})(1 - a'_{P_{Лk}})]. \quad (1)$$

Здесь  $a_{P_{ТП}}$ ,  $a'_{P_{ТП}}$  и  $a_{P_{Л}}$ ,  $a'_{P_{Л}}$  указывают на отказ разъединителей  $P_{ТП}$  и  $P_{Л}$  первого и второго типа.

Используя известное свойство булевой алгебры для переменных  $a$ , и заменив символы событий  $a_i$  их вероятностями  $p_i=1-q_i$  получим уравнение для определения вероятности безотказной работы системы:

$$P_2 = \left[ 1 - \left( 1 - p_{V_k} \prod_{i=0}^{k-1} p_{L_i} \prod_{i=1}^k (1 - q_{P_{ТП}}) \prod_{i=1}^k (1 - q_{P_{Л}}) \right) \right] (1 - q'_{P_{Л}} q_{L_k}) \prod_{i=1, i \neq k}^{k-1} (1 - q'_{P_{ТП}} q_{V_i}) \quad (2)$$

где  $q_{V_i} = 1 - p_{V_i}$  – вероятность отказа  $i$ -го узла нагрузки;  $q_{P_{ТП}}$ ,  $q'_{P_{ТП}}$  и  $q_{P_{Л}}$ ,  $q'_{P_{Л}}$  – вероятности возникновения отказов в срабатывании разъединителей  $P_{ТП}$  и  $P_{Л}$  1-го и 2-го типа соответственно.

Для получения более компактного выражения введем следующие допущения:

– вероятности отказов и безотказной работы для участков питающего фидера  $L_{Li}$  равны;

– так как в качестве подстанционных и линейных разъединителей  $P_{ТП}$  и  $P_{Л}$  в сельских населенных пунктах (при использовании СКТП) используются разъединители одного типа РЛНД-10 будем считать  $q_{P_{ТП}} = q_{P_{Л}} = q_P$ ;  $q'_{P_{ТП}} = q'_{P_{Л}} = q'_P$ .

Введение перечисленных допущений позволяет преобразовать (2) к более компактному и удобному для дальнейших рассуждений виду

$$P_2 = \left[ 1 - \left( 1 - p_{V_k} \cdot p_{L_i}^k \cdot (1 - q_P)^{2k} \right) \right] \cdot (1 - q'_P q_{L_i}) (1 - q'_P q_V)^{k-1}. \quad (3)$$

Проведя математические преобразования, представим выражение (3) в следующем виде:

$$P_2(t) = P_2(t, k) = \exp \left[ - (I_V + k I_{L_i} + 2k \cdot I_P) t \right] \exp \left\{ - I'_P \left[ (k-1) I_V + I_{L_i} \right] \cdot t^2 \right\} \quad (4)$$

где  $I_{L_i}$  – параметр интенсивности отказов отрезка ВЛ-10(6) кВ, а  $I_P$  и  $I'_P$  – параметры интенсивности отказов срабатывания разъединителей  $P_{ТП}$   $P_{Л}$  первого и второго типа соответственно;  $k$  – порядковый номер исследуемого узла нагрузки, отсчитываемый от головного участка ВЛ-10(6) кВ.

Проведя сравнение графиков зависимостей  $P_1(t)$  и  $P_2(t)$  (рисунок 5, рисунок б), можно сделать вывод, что при общем числе узлов нагрузки  $N=10$  выигрыш в надежности от применения секционирующих разъединителей имеет место, только для тех узлов нагрузки, которые менее удалены от питающего центра ( $k=1, k=5$  на рисунке б).

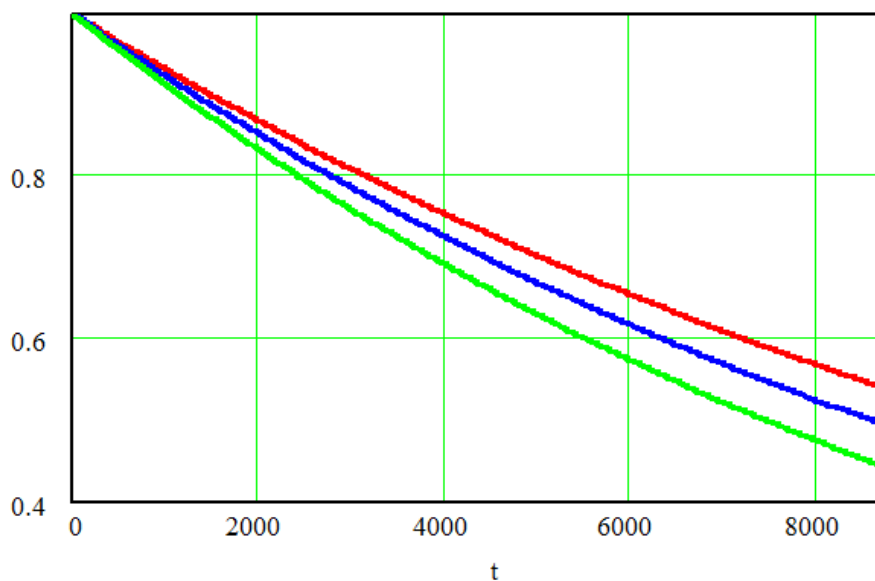


Рисунок 5 – Зависимость  $P_1(t)$  при  $N=1, 5, 10$ .

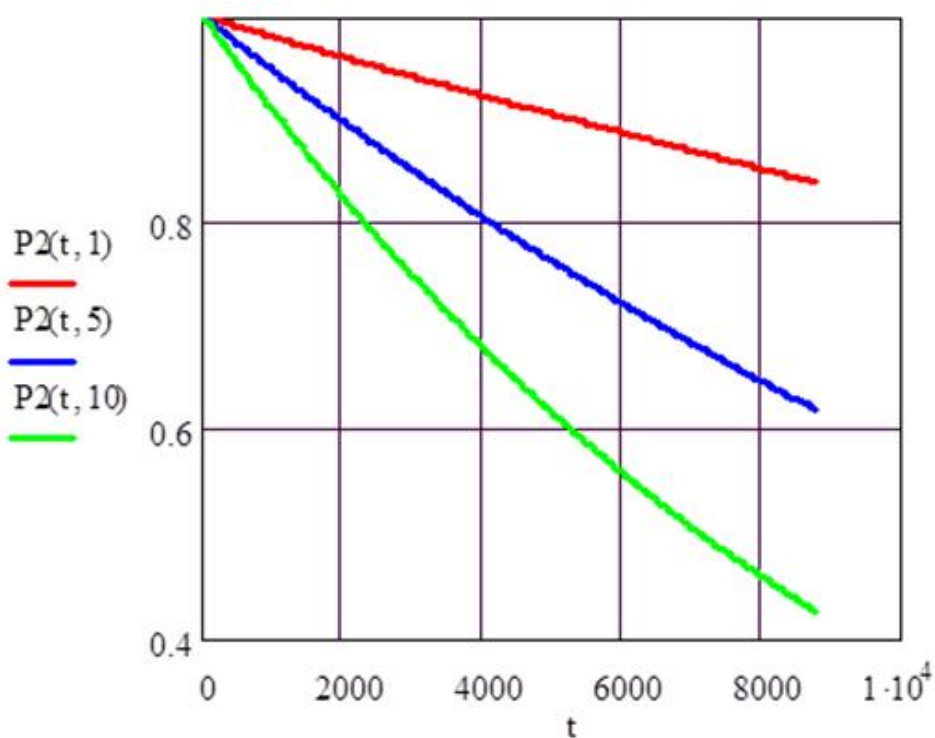


Рисунок 6 – Зависимость  $P_2(t)$  для  $k=1, k=5, k=10$ .

Для удаленных узлов ( $k=10$  на рисунке 6) вероятность бесперебойного электроснабжения от сети с секционированием меньше, чем в отсутствие последнего. Это обусловлено уменьшением надежности участка с



последовательно соединенными элементами логической за счет включения в нее секционирующих разъединителей.

Различная зависимость  $P_1(t)$  и  $P_2(t)$  (первая определяется лишь числом узлов нагрузки  $N$ , вторая – только порядковым номером  $k$ ) затрудняет их количественное сравнение из-за неоднозначности трактовки результатов. Кроме того, различие надежности электроснабжения узлов нагрузки при секционировании питающего фидера усложняет главную задачу исследований – определение стоимости недоотпуска электроэнергии.

Устранение указанного недостатка возможно путем введения усредненного по всей совокупности узлов нагрузки показателя надежности. С этой целью, введем понятие интегральной вероятности бесперебойного электроснабжения

$$\bar{P}_2(t, N) = \frac{1}{N} \int_0^N P_2(t, k) dk. \quad (5)$$

Для дискретной переменной  $k$  операцию интегрирования заменим суммированием по всем  $k = \overline{1, N}$ . Окончательно имеем

$$\bar{P}_2(t, N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_2(t, k). \quad (6)$$

Введение в рассмотрение интегральной характеристики  $\bar{P}_2(t, N)$  позволяет количественно оценить средний выигрыш в надежности для произвольного количества узлов нагрузки  $N$  от применения секционирования основного питающего фидера, который наглядно иллюстрируется на графиках, изображенных на рисунке 7.

Выражения (5), (6) для вероятности безотказного функционирования радиальной распределительной сети с секционированием питающего фидера позволяет получить уравнение для среднего времени наработки на отказ радиальной сети без секционирования. В результате интегрирования имеем выражение и соответствующий график (рисунок 7):

$$\begin{aligned}
 T_{0_2} &= \int_0^{\infty} \bar{P}_2(t, N) dt = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} \sum_{k=1}^N P_2(t, k) dt = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \int_0^{\infty} P_2(t, k) dt = \\
 &= \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N \sqrt{\frac{p}{I'_P [(k-1)I_y + I_{L_i}]}} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{I_y + kI_{L_i} + 2k \cdot I_P}{2\sqrt{I'_P [(k-1)I_y + I_{L_i}]}} \right] \right\} \\
 &\quad \times \exp \left[ \frac{(I_y + kI_{L_i} + 2k \cdot I_P)^2}{I'_P [(k-1)I_y + I_{L_i}]} \right]. \tag{7}
 \end{aligned}$$

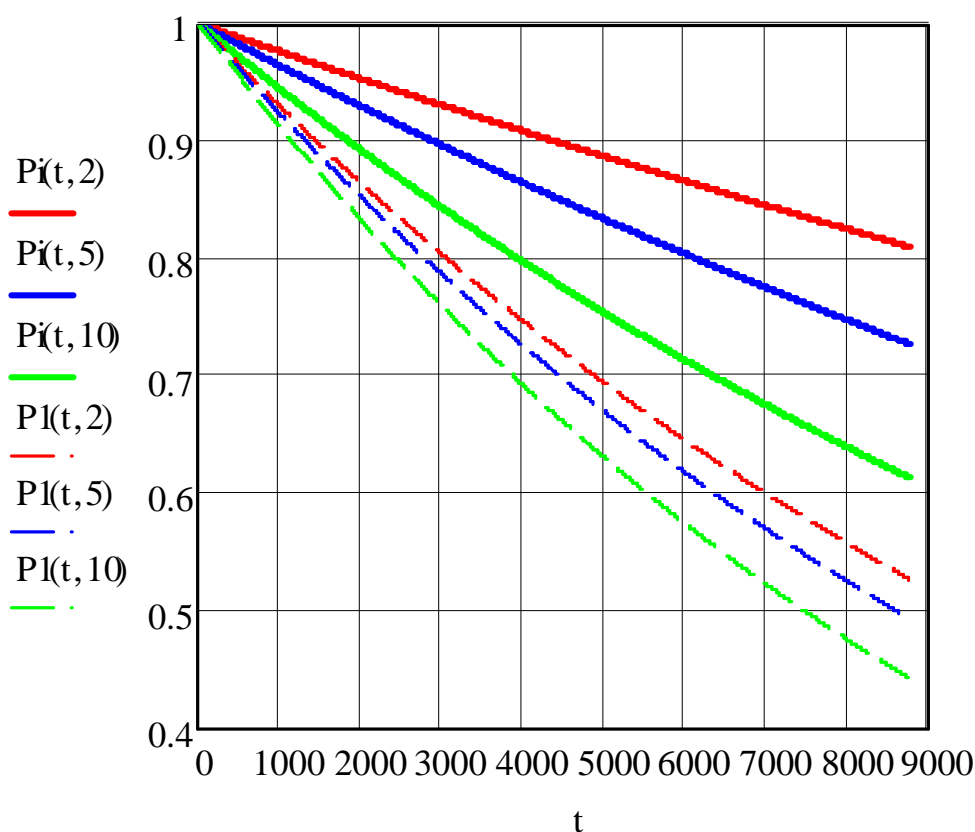


Рисунок 7 – Зависимости  $\bar{P}_2(t, N)$  (сплошная линия) и  $P_1(t, N)$  (пунктир) при  $N=2, N=5, N=10$ .

График зависимости  $\bar{T}_2(N)$  изображен на рисунке 8.

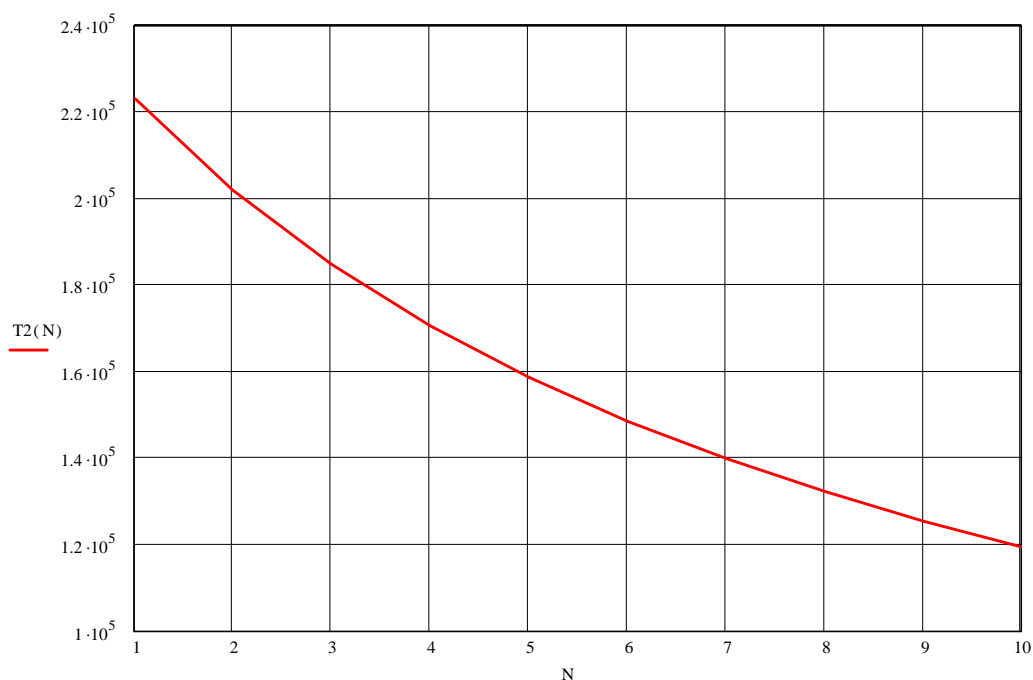


Рисунок 8 – Зависимость среднего времени  $\bar{T}_{02}(N)$  наработки на отказ от количества узлов нагрузки (N)

Согласно построенному графику величина среднего времени наработки на отказ радиальной схемы распределительной сети с секционированием питающей линии сети уменьшается обратно пропорционально числу узлов нагрузки N

### Литература

1. Кубарев А. И. и др. Методы оценки обеспечения надежности технологических процессов. /Обзор/. М.: ВНИИМАШ, 1975, - 49 с.
2. Бабкин А. И. Определение работоспособности сложных систем. Уч. Пособие по курсу «Основы теории надежности сложных систем». М.: Издательство МВТУ им. Баумана, 1987. – 120 с.
3. Оськин С.В., Надежность работы электрифицированного оборудования сельскохозяйственного производства //Энергосберегающие технологии и процессы в АПК., сб. научн. трудов: Краснодар, КГАУ, 2002.
4. Оськин С.В. Повышение надежности электроприводов в сельском хозяйстве / С.В.Оськин, И.А. Переверзев, А.Ф. Кроневальд// Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – №1. – С.20-21.

### References

1. Kubarev A. I. i dr. Metody ocenki obespechenija nadezhnosti tehnologicheskikh processov. /Obzor/. М.: VNIIMASh, 1975, - 49 s.

2. Babkin A. I. Opredelenie rabotosposobnosti slozhnyh sistem. Uch. Posobie po kur-su «Osnovy teorii nadezhnosti slozhnyh sistem». M.: Izdatel'stvo MVTU im. Bauma-na, 1987. – 120 s.
3. Os'kin S.V., Nadezhnost' raboty jelektrificirovannogo oborudovanija sel'skoho-zhajstvennogo proizvodstva //Jenergoberegajushhie tehnologii i processy v APK., sb. nauchn. trudov: Krasnodar, KGAU, 2002.
4. Os'kin S.V. Povyshenie nadezhnosti jelektrivodov v sel'skom hozjajstve / S.V.Os'kin, I.A. Pereverzev, A.F. Kroneval'd// Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – 2008. – №1. – S.20-21.