

УДК 621.3.019.34

**ЭНТРОПИЙНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК  
ENTROPY ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF ELECTRIC  
POWER PLANTS**

В.В. Дюров, Т.Д. Невмержицкая

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

alexeystminsk@gmail.com

V. Diurau, T. Nevmerzhitskaya

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** В данной научной работе будет рассмотрен метод энтропийной оценки надежности электрической сети, преимущества данного метода, а также расчет основных показателей надежности для заданной схемы местной электрической сети 35 кВ.*

***Abstract:** In this research it is considered the method of entropy assessment of the reliability of the electrical network, advantages of this method, and calculation of the main indicators of reliability for a given scheme of the local electric network 35 kV.*

***Ключевые слова:** Энтропия, местная электрическая сеть, надежность,*

***Keywords:** Entropy, local electric network, reliability.*

### **Введение**

Главные требования на данный момент к энергосистеме – это повышение экономичности технологических процессов и надежность оборудования на всех этапах его жизненного пути. В процессе эксплуатации технические системы могут терять свою работоспособность, что вызывает их отказы. Это происходит вследствие естественных процессов изнашивания и под влиянием электротехнических и термических явлений. Одним из лучших и качественных является вероятностный или энтропийный метод оценки системы, который позволяет определить оптимальный, экономически оправданный и достижимый уровень надежности с учетом обеспечения безопасности эксплуатации рассматриваемой системы.

Поэтому в данной научно-исследовательской работе будет производиться расчет надежности с помощью метода энтропийной оценки.

### **Основная часть**

В ходе реализации случайного процесса в электроэнергетической установке за какой-либо период времени образуются счетные множества. Это множества различных повреждений, множества действий и отказов защиты и автоматики, множества аварий и множества состояний установки.

Степень неоднородности или разнообразия множеств каких-либо элементов зависит от общего числа элементов, входящих в данное множество, от числа различных элементов и их плотности в данном множестве. Плотности раз-

личных элементов задаются обычно вероятностью получить элемент данного вида при случайной выборке из данного множества.

Для измерения разнообразия множества используется энтропия данного множества  $A$  элементов, которая определяется по выражению

$$H(A) = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad (1)$$

где  $H(A)$  – энтропия множества  $A$ ;

$p_i$  – вероятность появления  $i$ -го элемента при случайной выборке из множества  $A$ ; суммирование производится по всем элементам полного множества элементов, т.е.

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (2)$$

Условной энтропией множеств, при условии, что во множестве  $A$  появился элемент  $a_i$  называется величина, которая определяется как

$$H(B/a_i) = \sum_{j=1}^m \eta \left[ P(b_j/a_i) \right], \quad (3)$$

где  $P(b_j/a_i)$  – условная вероятность появления элемент  $b_j$  во множестве  $B$ , если во множестве  $A$  появился элемент  $a_i$ .

Средняя условная энтропия  $H(B/A)$  определяется как математическое ожидание условной энтропии:

$$H(B/A) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_i \eta \left[ P(b_j/a_i) \right]. \quad (4)$$

При последовательном независимом соединении элементов в одноцепной линии электропередачи их энтропия в силу свойства аддитивности, будет равна:

$$H_q(E) = H_q(E_a) = H_q(E_1) + H_q(E_2). \quad (5)$$

При соединении трех и более независимых элементов последовательно  $H_q(E)$  объединения вычисляется простым сложением, аналогично с  $H_Q(E)$ :

$$H_q(E) = \sum_{i=1}^n H_q(E_i). \quad (6)$$

Энтропия возмущений  $H_Q(D)$  определяется при независимом отказе элементов

$$H_Q(D) = H_Q(D_1) + H_Q(D_2), \quad (7)$$

где  $H(D)$ ,  $H(R)$  – энтропия множеств  $R$  и  $D$ ;

$H(R/D)$  – средняя условная энтропия множества  $R$  при определенном воздействии из множества  $D$ .

$$H(E) \geq H(D) + H(R/D) - H(R). \quad (8)$$

Энтропия  $H(E)$  является мерой неопределенности состояний установки. Но она может стать мерой ненадежности системы если все нормальные эксплуатационные состояния рассматривать как одно состояние, а доля энтропии  $H(E)$  будет близка к нулю, тогда  $H(E)$  станет мерой неопределенности того, в каком состоянии находится установка – в нормальной эксплуатации или аварийных условиях. [1]

Согласно (8) энтропия состояний  $H(E)$  имеет минимум, а выражение является для минимальной ненадежности, которую можно обеспечить при заданном множестве аварий  $D$  и множестве выбранных действий противоаварийной автоматики  $R$  при безотказной работе:

$$H(E)_{\min} = H(D) + H(R/D) - H(R). \quad (9)$$

Вероятности появления элементов множества  $E$  можно связывать с вероятностями нахождения элементов установки в различных состояниях: нормальных  $p_i$  и аварийных  $q_i$ . Тогда энтропия  $H_Q(E)$  будет мерой готовности, мерой неопределенности заставить установку в состоянии работоспособности или неработоспособности ее элементов. Определив вероятности  $p$  и  $q$  для всей установки, можно рассматривать  $H_Q(E_a)$  как меру бесперебойности.

Также энтропия  $H_Q(E)$  является функцией времени. При рассмотрении бесконечно малого отрезка времени  $H_Q(E)$  велика за счет большой вероятности безотказной работы. При увеличении рассматриваемого отрезка времени  $H_Q(E)$  возрастает за счет увеличения вероятностей отказов и аварий. Если в установке не всякий отказ элемента приводит к отказу всей установки, к аварии, то, связав величину энтропии только с двумя вероятностями  $P$  и  $Q$  получим:

$$Qa = 1 - P, \quad (10)$$

где  $P$  – вероятность безаварийной работы;

$Q_a$  – вероятность аварии.

Тогда получим меру безаварийности  $H_Q(E_a)$ .

При последовательном соединении элементов, не учитывая выключатели и коммутационную аппаратуру, энтропия  $H_Q(E)$ , будет являться энтропией множества возмущений  $H(D)$ :

$$H_Q(D) = H_Q(E). \quad (11)$$

Энтропия множества действий автоматики определяется вероятностями отключений поврежденных элементов, вероятностями ложных отключений исправных элементов и вероятностями отказа в отключении поврежденных элементов:

$$H_Q(R) = \eta(Q_{л.откл}) + \eta(Q_{о.ср}) + \eta(P_{откл}), \quad (12)$$

где  $P_{откл}$  – вероятность отключения поврежденных элементов;

$Q_{л.откл}$  – вероятность ложного и неселективного отключения исправных элементов;

$Q_{о.ср}$  – вероятность отказа в срабатывании.

В случае пуассоновского потока отказов

$$P(t) = e^{-a} \quad (13)$$

где  $a$  – среднее число отказов в течение времени  $t$ ;

В случае простейшего потока

$$a = \lambda t \quad (14)$$

Рассмотрим электрическую схему 35 кВ представленной на рисунке 1.

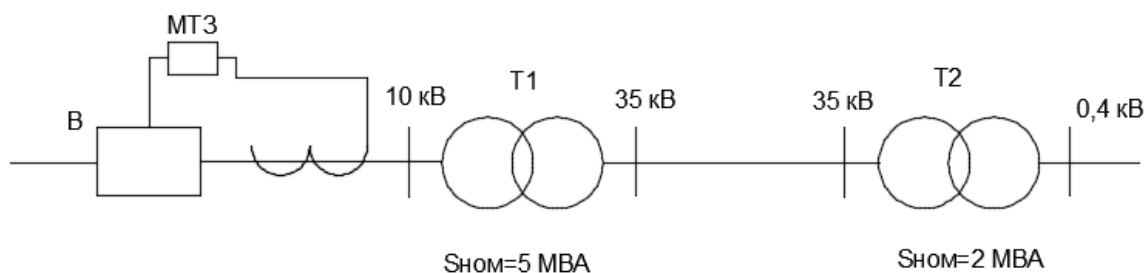


Рисунок 1 – Исходная схема

Интенсивности отказов примем по [2]

Для трансформатора 1 –  $\lambda_1 = 0,01$  1/год;

Для трансформатора 2 –  $\lambda_2 = 0,008$  1/год;

Для воздушной линии –  $\lambda_3 = 0,066$  1/год.

Для максимальной токовой защиты МТЗ с реле прямого действия на ВМП-10

Отказ в срабатывании  $\lambda_{л.откл} = 0,004$  1/год;

Ложное срабатывание  $\lambda_{о.ср} = 0,0015$  1/год;

Интенсивность отказов  $\lambda_B = 0,009$  1/год.

Условная вероятность отказа в срабатывании при возникновении повреждения в зоне действия отсечки (в линии) – 0,05, при повреждении в трансформаторе – 0,01.

Оценим величину  $H_Q(D)$ , приняв отказы линии и трансформатора независимыми и расчетное время  $t_p$ , равное 1 году,

По формуле (14) находим:

$$\alpha_1 = 0,01 \cdot 1 = 0,01$$

$$\alpha_2 = 0,066 \cdot 1 = 0,066$$

$$\alpha_3 = 0,008 \cdot 1 = 0,008$$

По формуле (13) рассчитаем:

$$P_1 = e^{-0,01} = 0,990$$

$$P_2 = e^{-0,066} = 0,936$$

$$P_3 = e^{-0,008} = 0,992$$

По формуле (10) находим вероятность аварий:

$$Q_1 = 1 - P_1 = 1 - 0,990 = 0,0095$$

$$Q_2 = 1 - P_2 = 1 - 0,936 = 0,064$$

$$Q_3 = 1 - P_3 = 1 - 0,992 = 0,007$$

$$\eta(P_1) = -P_1 \cdot \log_2(P_1) = -0,990 \cdot \log_2(0,990) = 0,014$$

$$\eta(Q_1) = -Q_1 \cdot \log_2(Q_1) = -0,095 \cdot \log_2(0,095) = 0,066$$

$$\eta(P_2) = -P_2 \cdot \log_2(P_2) = -0,936 \cdot \log_2(0,936) = 0,089$$

$$\eta(Q_2) = -Q_2 \cdot \log_2(Q_2) = -0,064 \cdot \log_2(0,064) = 0,253$$

$$\eta(P_3) = -P_3 \cdot \log_2(P_3) = -0,992 \cdot \log_2(0,992) = 0,011$$

$$\eta(Q_3) = -Q_3 \cdot \log_2(Q_3) = -0,007 \cdot \log_2(0,007) = 0,055$$

$$H_Q(E_1) = \eta(P_1) + \eta(Q_1) = 0,014 + 0,066 = 0,0805$$

$$H_Q(E_2) = \eta(P_2) + \eta(Q_2) = 0,089 + 0,253 = 0,343$$

$$H_Q(E_3) = \eta(P_3) + \eta(Q_3) = 0,011 + 0,055 = 0,067$$

По формулам (5), (6), (11) находим:

$$H_Q(D) = H_Q(D_1) + H_Q(D_2) + H_Q(D_3) = H_Q(E_1) + H_Q(E_2) + H_Q(E_3) = 0,0805 + 0,343 + 0,067 = 0,49$$

Для определения величины  $H_Q(R)$ :

$$Q_{л.отк} = 1 - \exp(-\lambda_{л.отк} \cdot t_p) = 1 - \exp(-0,004 \cdot 1) = 3,992 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{л.отк} = 1 - Q_{л.отк} = 1 - 3,992 \cdot 10^{-3} = 0,996$$

$$Q_{о.ср} = 1 - \exp(-\lambda_{о.ср} \cdot t_p) = 1 - \exp(-0,0015 \cdot 1) = 1,499 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{о.ср} = 1 - Q_{о.ср} = 1 - 1,499 \cdot 10^{-3} = 0,999$$

где  $P_{л.отк}$  – вероятность работы без ложного и неселективного отключения исправных элементов;

$P_{о.ср}$  – вероятность работы без отказов в срабатывании.

$$\begin{aligned}
 P_{откл} &= 1 - Q_{л.откл} - Q_{о.ср} - Q_{л.откл} \cdot Q_{о.ср} = 1 - 3,992 \cdot 10^{-3} - 1,499 \cdot 10^{-3} - 3,992 \cdot 10^{-3} \cdot 1,499 \cdot 10^{-3} = 0,995 \\
 \eta(Q_{л.откл}) &= -Q_{л.откл} \cdot \log_2(Q_{л.откл}) = -3,992 \cdot 10^{-3} \cdot \log_2(3,992 \cdot 10^{-3}) = 0,0318 \\
 \eta(P_{л.откл}) &= -P_{л.откл} \cdot \log_2(P_{л.откл}) = -0,996 \cdot \log_2(0,996) = 5,748 \cdot 10^{-3} \\
 \eta(Q_{о.ср}) &= -Q_{о.ср} \cdot \log_2(Q_{о.ср}) = -1,499 \cdot 10^{-3} \cdot \log_2(1,499 \cdot 10^{-3}) = 0,01406 \\
 \eta(P_{откл}) &= -P_{откл} \cdot \log_2(P_{откл}) = -0,995 \cdot \log_2(0,995) = 7,908 \cdot 10^{-3}
 \end{aligned}$$

По формуле (12) находим  $H_Q(R)$ :

$$H_Q(R) = 0,0318 + 0,01406 + 0,007908 = 0,054$$

Для вычислений  $(R/D)$  по формуле (4) находим:

$$\begin{aligned}
 P_{усл.линии} &= 1 - Q_{усл.линии} = 1 - 0,05 = 0,95 \\
 P_{усл.тр} &= 1 - Q_{усл.тр} = 1 - 0,01 = 0,99 \\
 \eta(Q_{усл.линии}) &= -Q_{усл.линии} \cdot \log_2(Q_{усл.линии}) = -0,05 \cdot \log_2(0,05) = 0,216 \\
 \eta(Q_{усл.тр}) &= -Q_{усл.тр} \cdot \log_2(Q_{усл.тр}) = -0,01 \cdot \log_2(0,01) = 0,066 \\
 \eta(P_{усл.линии}) &= -P_{усл.линии} \cdot \log_2(P_{усл.линии}) = -0,95 \cdot \log_2(0,95) = 0,070 \\
 \eta(P_{усл.тр}) &= -P_{усл.тр} \cdot \log_2(P_{усл.тр}) = -0,99 \cdot \log_2(0,99) = 0,014 \\
 H_Q(R/D) &= e^{-0,084} \cdot [\eta(0,004) + \eta(0,996)] + \lambda_1 \cdot [\eta(0,01) + \eta(0,99)] + 0,066[\eta(0,05) + \eta(0,95)] + \\
 &+ 0,008[\eta(0,01) + \eta(0,99)] = 0,055
 \end{aligned}$$

По выражению (9) получим:

$$H_Q(E)_{мин} = 0,490 + 0,055 - 0,054 = 0,491.$$

Оценим энтропию безотказности  $H_Q(E)$  для выбранной схемы как для последовательного соединения четырех элементов: выключателя с релейной защитой, воздушной линии и двух трансформаторов.

Отказы линии и трансформатора являются независимыми, поэтому определяем энтропию безотказности сначала для них по выражению (5):

$$H_Q(E_o) = H_Q(E_1) + H_Q(E_2) = 0,0805 + 0,3426 = 0,423$$

Теперь для системы из четырех элементов получим:

$$H_Q(E_c) = H_Q(E_B) + R_B \cdot H_Q(E_o/B) \tag{15}$$

При собственной повреждаемости выключателя  $Q_B = 0,0055$  и безотказной работе  $P_B = 1 - Q_B = 0,9945$ ;

$$\eta(Q_B) = -Q_B \cdot \log_2(Q_B) = -0,0055 \cdot \log_2(0,0055) = 0,0413$$

$$\eta(P_B) = -P_B \cdot \log_2(P_B) = 0,0079$$

$$P_Q(E_B) = \eta(Q_B) + \eta(P_B) = 0,0413 + 0,0079 = 0,049$$

Величина  $H_Q(E_0/B)$  – энтропия безотказности воздушной линии и трансформаторов при исправном выключателе меньше чем  $H_Q(E_0)$  из-за того, что расчетное время для объединенного элемента должно быть уменьшено на среднее время простоя выключателя в аварийном ремонте.

$$\eta_{отк1} = -[\lambda_1 \cdot (1 - \lambda_B)] \cdot \log_2[\lambda_1 \cdot (1 - \lambda_B)] = -[0,01 \cdot (1 - 0,009)] \cdot$$

$$\cdot \log_2[0,01 \cdot (1 - 0,009)] = 0,066$$

$$\eta_{раб1} = -[1 - \lambda_1 \cdot (1 - \lambda_B)] \cdot \log_2[1 - \lambda_1 \cdot (1 - \lambda_B)] = -[1 - 0,01 \cdot (1 - 0,009)] \cdot$$

$$\cdot \log_2[1 - 0,01 \cdot (1 - 0,009)] = 0,014$$

$$\eta_{отк2} = -[\lambda_2 \cdot (1 - \lambda_B)] \cdot \log_2[\lambda_2 \cdot (1 - \lambda_B)] = -[0,066 \cdot (1 - 0,009)] \cdot$$

$$\cdot \log_2[0,066 \cdot (1 - 0,009)] = 0,257$$

$$\eta_{раб2} = -[1 - \lambda_2 \cdot (1 - \lambda_B)] \cdot \log_2[1 - \lambda_2 \cdot (1 - \lambda_B)] = -[1 - 0,066 \cdot (1 - 0,009)] \cdot$$

$$\cdot \log_2[1 - 0,066 \cdot (1 - 0,009)] = 0,0912$$

$$\eta_{отк3} = -[\lambda_3 \cdot (1 - \lambda_B)] \cdot \log_2[\lambda_3 \cdot (1 - \lambda_B)] = -[0,008 \cdot (1 - 0,009)] \cdot$$

$$\cdot \log_2[0,008 \cdot (1 - 0,009)] = 0,055$$

$$\eta_{раб3} = -[1 - \lambda_3 \cdot (1 - \lambda_B)] \cdot \log_2[1 - \lambda_3 \cdot (1 - \lambda_B)] = -[1 - 0,008 \cdot (1 - 0,009)] \cdot$$

$$\cdot \log_2[1 - 0,008 \cdot (1 - 0,009)] = 0,011$$

Если коэффициент простоя выключателя равен 0,0001, то получим:

$$H_Q(E_0/B) = \eta_{отк1} + \eta_{отк2} + \eta_{раб1} + \eta_{раб2} + \eta_{отк3} + \eta_{раб3} = 0,066 + 0,257 + 0,014 + 0,0912 + 0,055 + 0,0011 = 0,495$$

Тогда по формуле (15) находим

$$H_Q(E_c) = 0,049 + 0,995 \cdot 0,495 = 0,542,$$

$$H(E)_{мин} < H(E_c); 0,491 < 0,542.$$

### Заключение

В данной научной работе был проведен расчет надежности заданной электрической сети методом энтропийной оценки. По результатам расчета выполняется необходимое условие  $H(E_{мин}) < H(E_c)$ , что свидетельствует об успешности расчета.

Применение энтропийных оценок дает возможность наглядно оценить влияние на надежность установки такого фактора, как надежность действия устройств релейной защиты и автоматики.

### **Литература**

1. Ю.Б. Гук Оценка надежности электроустановок / Ю.Б. Гук и др: по ред. Б.А. Константинова – Энергия, 1974. – 200с.
2. Справочник по проектированию подстанций – надежность главных схем [электронный ресурс] / Справочник по проектированию подстанций – надежность главных схем. – Режим доступа: <https://leg.co.ua/arhiv/podstancii/spravochnik-po-proektirovaniyu-podstanciy-7.html/>. – Дата доступа: 10.04.2021.