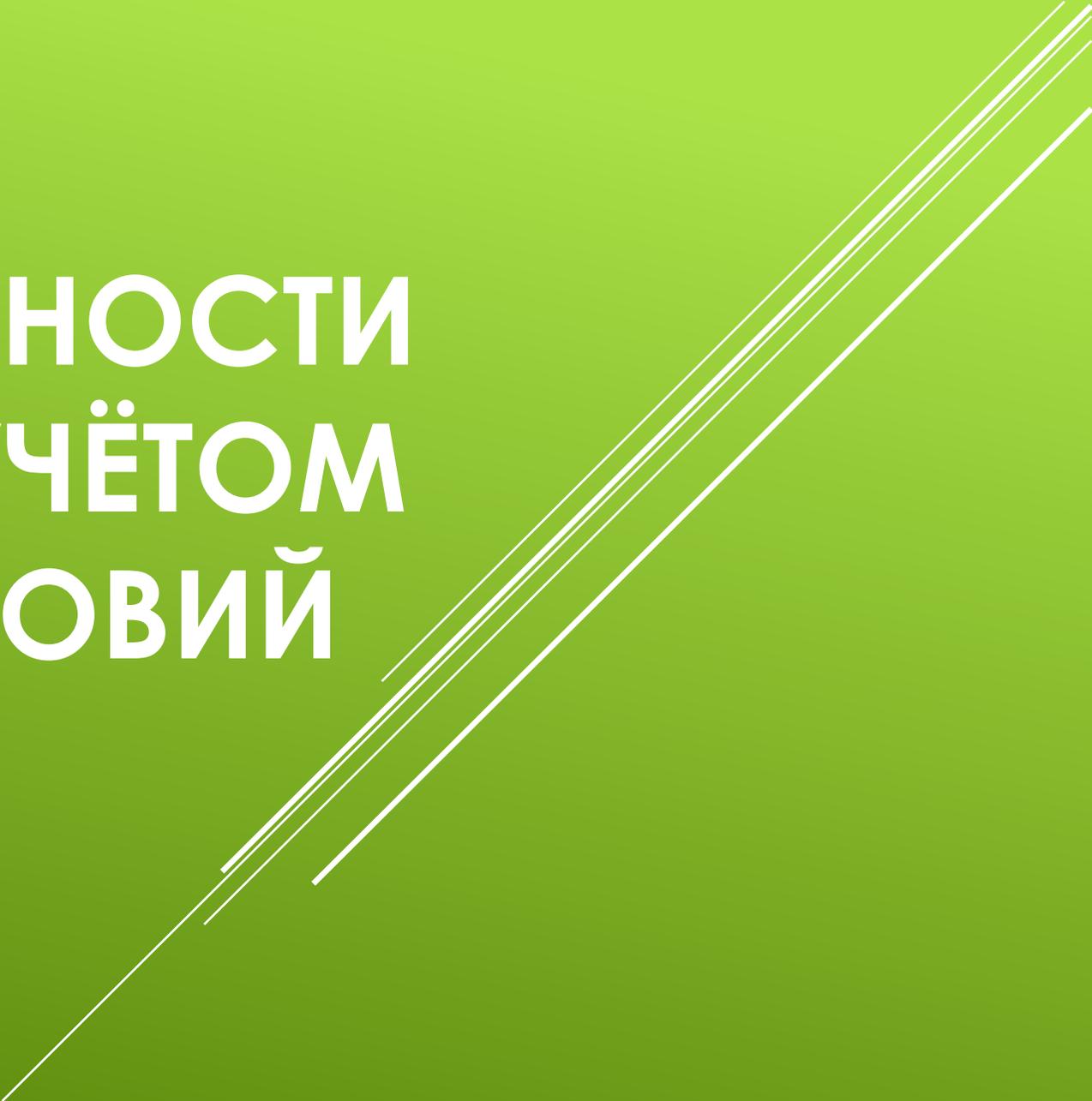


МОДЕЛЬ НАДЁЖНОСТИ ВЕТРОПАРКА С УЧЁТОМ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ

The image features a solid green background. On the right side, there are several thin, white, parallel lines that originate from the bottom right and extend towards the top right, creating a sense of motion or a modern design element.

Для обеспечения электроэнергией децентрализованных потребителей и использования в качестве резервных источников энергии при авариях всё чаще используются источники энергии на возобновляемых природных энергоресурсах: мини- и микро-ГЭС, гелиоустановки, ветроэнергетические установки (ВЭУ).

Для большинства ВЭУ начальная скорость ветра, обеспечивающая возможность их работы и выдачу электроэнергии, лежит в диапазоне 3-5 м/с, а номинальные рабочие скорости ветра – 6-12 м/с.

Скорость ветра весьма изменчива, а энергия пропорциональна третьей степени скорости ветра, т. е. при падении скорости ветра втрое, его энергия уменьшается в 27 раз. Во время штилей и слабого ветра ВЭУ работать не могут и должны быть остановлены с помощью тормозного устройства.

При анализе надёжности ВЭУ необходимо учитывать влияние безветренной погоды, чаще всего погода представляется моделью с двумя состояниями – чередующимися периодами нормальной и плохой погоды. При этом все типы плохой погоды (штиль, слабый ветер, штормовой ветер) объединены в одно состояние.

Поток изменения скорости ветра – это поток случайных событий с интенсивностью уменьшения скорости ветра (отказов) λ_0 и интенсивностью восстановления скорости ветра μ_n .

- λ_0 – интенсивность отказа (установления плохой погоды);
- μ_n – интенсивность восстановления (установления нормальной погоды);
- T_n – период нормальной погоды;
- T_0 – период плохой погоды.

$$\begin{aligned}\mu_n &= 1 / T_n \\ \lambda_0 &= 1 / T_0\end{aligned}$$

Рассмотрим парк ВЭУ, состоящий в общем случае из двух неодинаковых установок, для которых характерны периоды нормальной и плохой погоды. При построении модели надёжности такой системы приняты следующие **допущения**:

- отказы из-за плохой погоды и отказы других типов статистически независимы;
- отказы из-за плохой погоды связаны с остановом не менее двух ВЭУ;
- при отказе одной из нагруженных резервированных установок отказавшая ВЭУ восстанавливается, при отказе обеих ВЭУ восстанавливается весь парк;
- интенсивности плохой и нормальной погоды постоянны.

Состояния ветропарка:

E₀ – обе ВЭУ работоспособны;

E₁ – ВЭУ-1 в аварийном состоянии, ВЭУ-2 работоспособна;

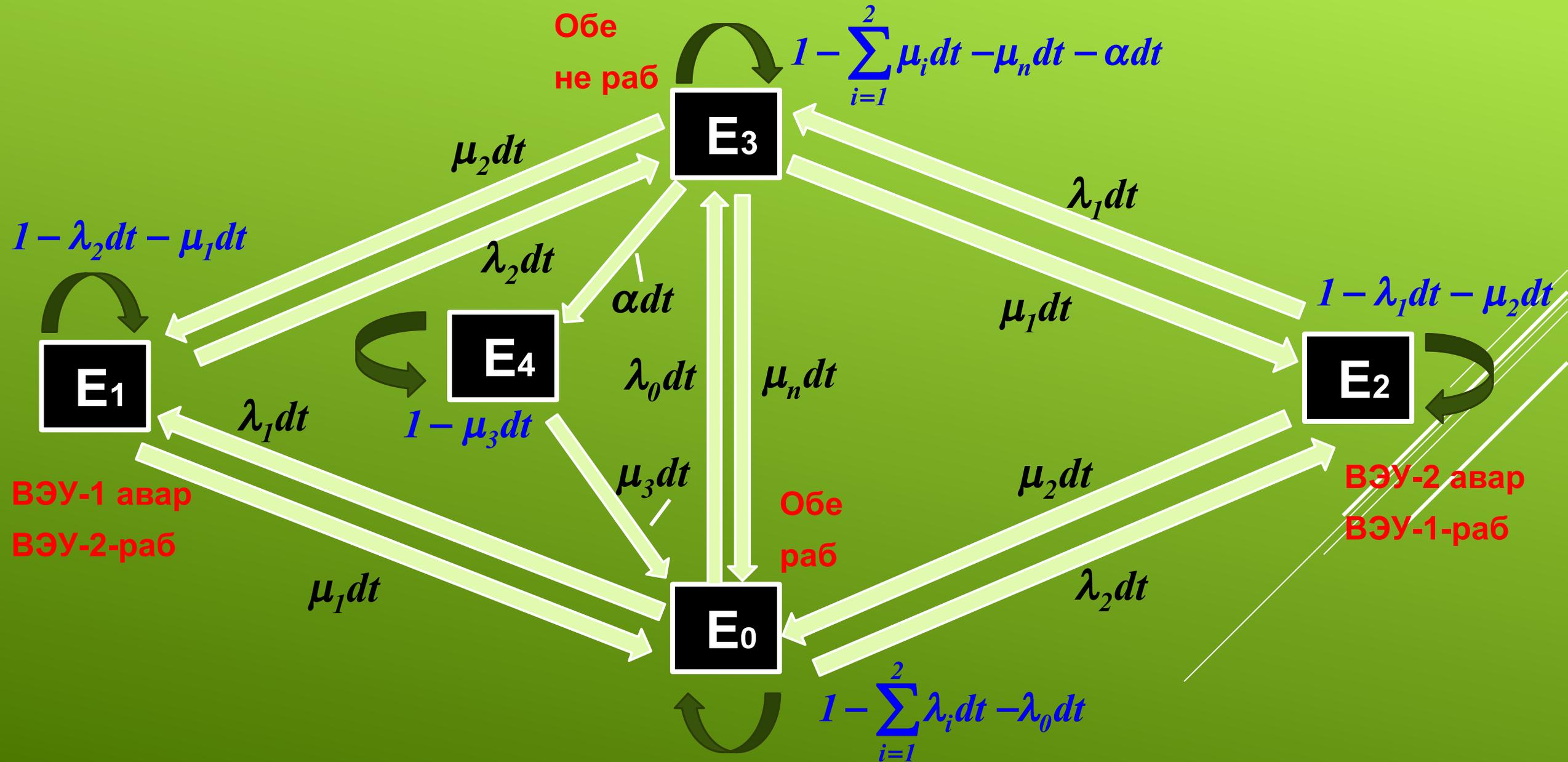
E₂ – ВЭУ-2 в аварийном состоянии, ВЭУ-1 работоспособна;

E₃ – обе ВЭУ неработоспособны или остановлены;

E₄ – имеются условия для восстановления обеих ВЭУ.

- ▶ λ_i – интенсивность отказов ВЭУ ($i=1,2$);
- ▶ μ_i – интенсивность восстановлений ВЭУ ($i=1,2$);
- ▶ μ_3 – интенсивность одновременного восстановления ВЭУ 1 и 2;
- ▶ a – коэффициент, характеризующий наличие ремонтного персонала и запасных узлов;
- ▶ λ_0 – интенсивность плохой погоды ;
- ▶ μ_n – интенсивность нормальной погоды.

Граф состояний для парка ВЭУ с учётом погодных условий:



Математическая модель представляется системой дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -\left(\sum_{i=1}^2 \lambda_i + \lambda_0\right)P_0(t) + \sum_{i=1}^2 P_i(t)\mu_i + P_4(t)\mu_3 \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= -(\lambda_2 + \mu_1)P_1(t) + P_3(t)\mu_2 + P_0(t)\lambda_1 \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= -(\lambda_1 + \mu_2)P_2(t) + P_0(t)\lambda_2 + P_3(t)\mu_1 \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= -\left(\sum_{i=1}^2 \mu_i + \mu_n + \alpha\right)P_3(t) + \sum_{i=1}^2 P_i(t)\lambda_{(3-i)} + P_0(t)\lambda_0 \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= -\mu_3 P_4(t) + P_3(t)\alpha \end{aligned} \right\}$$

при начальных условиях $t = 0, P_0(0) = 1$ (другие вероятности равны нулю) и $\sum_{i=0}^4 P_i(t) = 1$, решение системы уравнений имеет вид:

$$P_0 = \left[\Theta \left\{ 1 + \frac{\mu_1(\lambda_2 + \mu_1)}{\mu_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)} + \frac{(\lambda_2 + \mu_1)}{\mu_2} + \frac{\alpha(\lambda_2 + \mu_1)}{\mu_2\mu_3} \right\} + \frac{\lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_2)} - \frac{\mu_1\lambda_1}{(\lambda_1 + \mu_2)\mu_2} - \frac{\lambda_1}{\mu_2} - \frac{\alpha\lambda_1}{\mu_2\mu_3} + 1 \right]^{-1}$$

Гд $\Theta = P_1 / P_2$

е

$$\frac{P_1}{P_0} = \left[\frac{\mu_3 \lambda_1 + \alpha \lambda_1}{\mu_2} - \frac{\mu_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \mu_2} + \frac{\mu_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \mu_2} + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_0 \right] \times$$
$$\times \left[\frac{\mu_3 (\lambda_2 + \mu_1) + \alpha (\lambda_2 + \mu_1)}{\mu_2} + \frac{\mu_1 (\lambda_2 + \mu_1)}{\lambda_1 + \mu_2} + \mu_1 \right]^{-1}$$

$$P_1 = \Theta P_0$$

$$P_2 = \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \mu_2} - \frac{\mu_1 \lambda_1}{\mu_2 (\lambda_1 + \mu_2)} \right] P_0 + \frac{\mu_1 (\lambda_2 + \mu_1) P_1}{\mu_2 (\lambda_1 + \mu_2)}$$

$$P_3 = \frac{(\lambda_2 + \mu_1) P_1}{\mu_2} - \frac{\lambda_1 P_0}{\mu_2}$$

$$P_4 = \frac{\alpha (\lambda_2 + \mu_1) P_1}{\mu_2 \mu_3} - \frac{\alpha \lambda_1 P_0}{\mu_2 \mu_3}$$

Стационарный коэффициент готовности для парка ВЭУ:

$$K_{\Gamma} = \sum_{i=0}^2 P_i$$