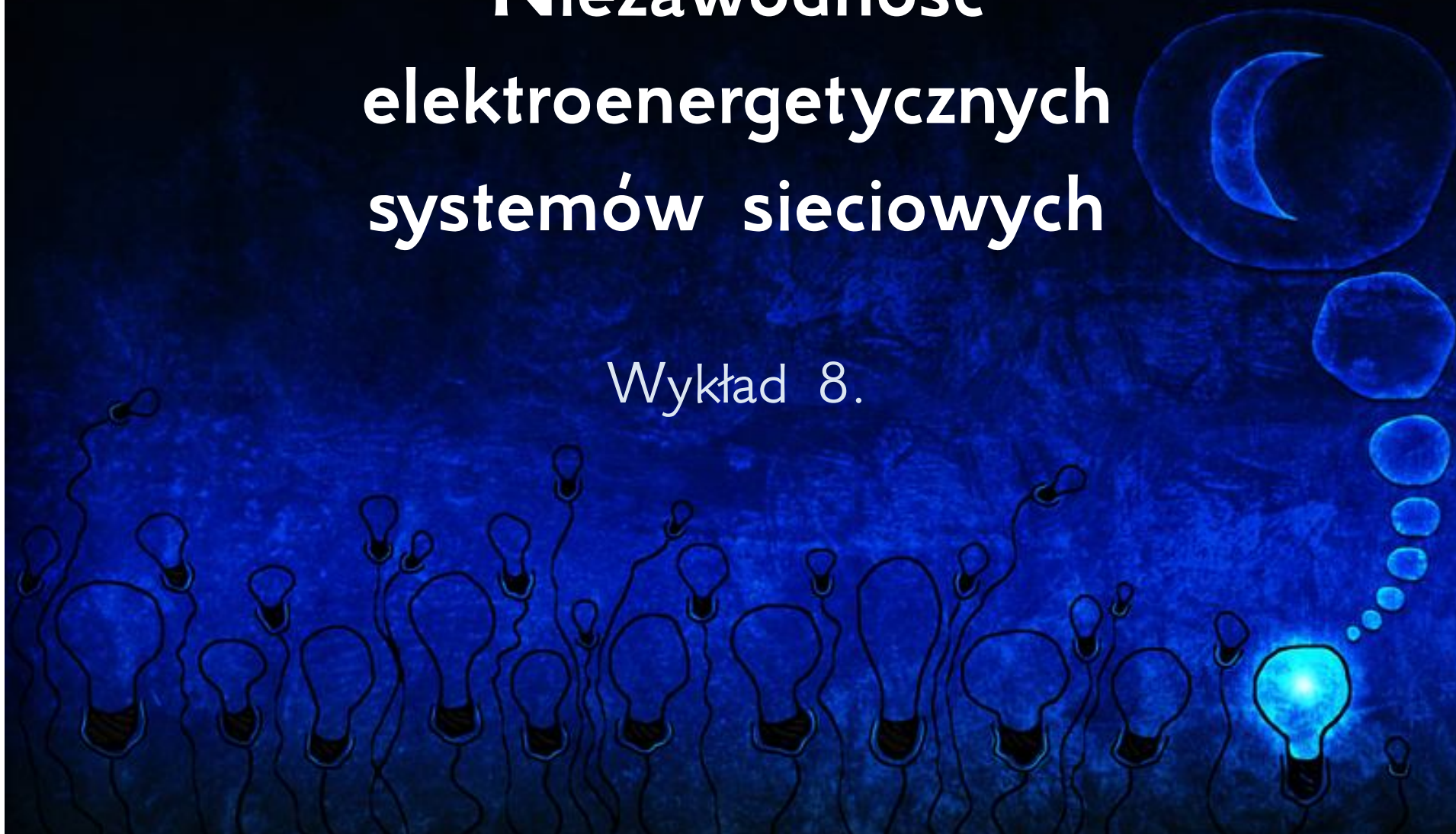


Niezawodność elektroenergetycznych systemów sieciowych

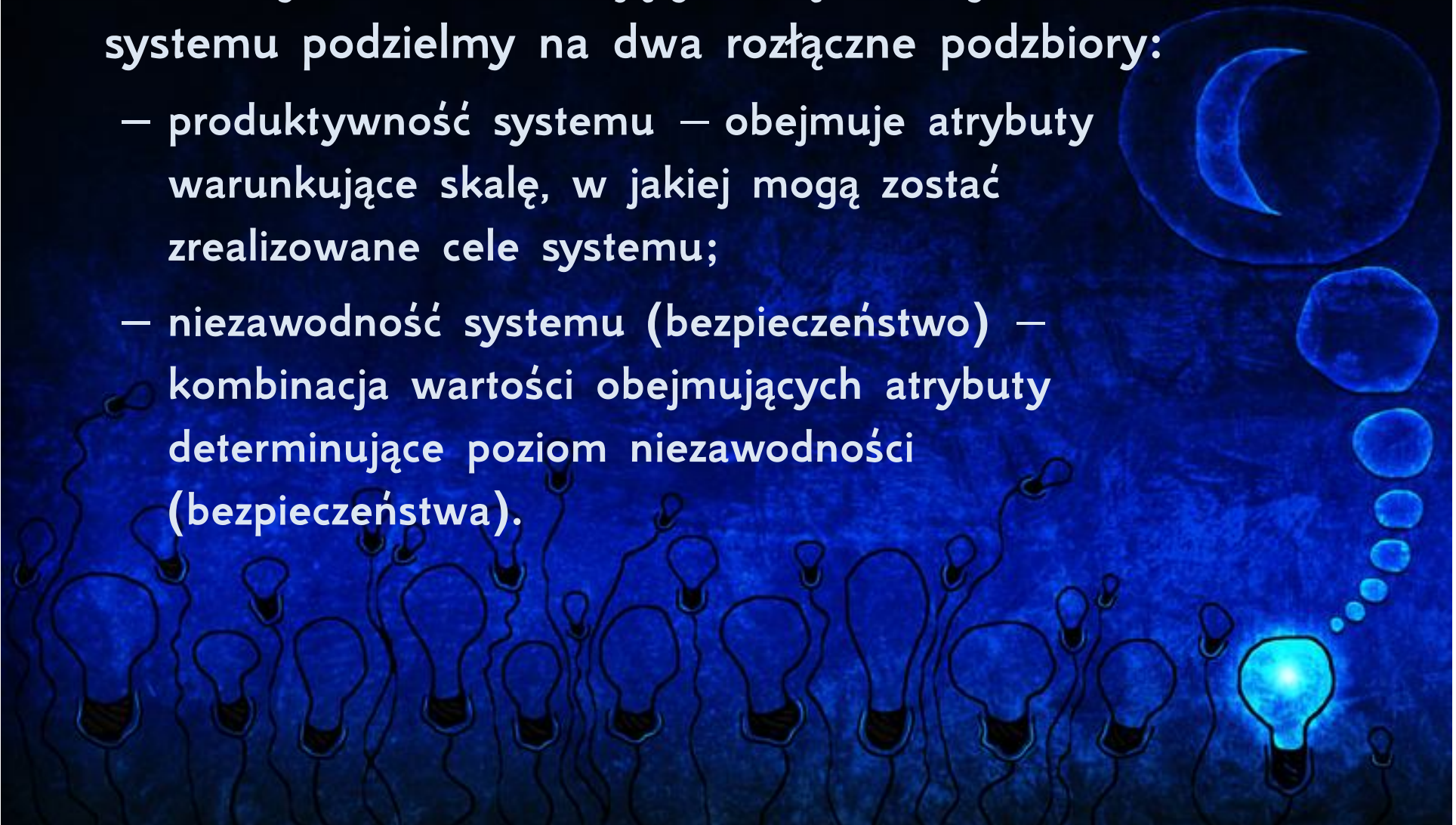
Wykład 8.



Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego I

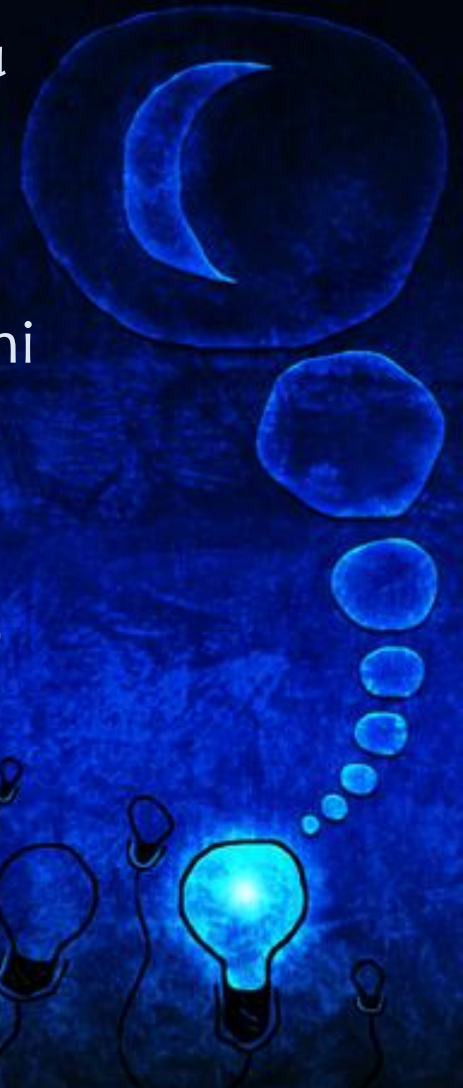
 Zbiór czynników składających się na użyteczność systemu podzielmy na dwa rozłączne podzbiory:

- produktywność systemu — obejmuje atrybuty warunkujące skalę, w jakiej mogą zostać zrealizowane cele systemu;
- niezawodność systemu (bezpieczeństwo) — kombinacja wartości obejmujących atrybuty determinujące poziom niezawodności (bezpieczeństwa).



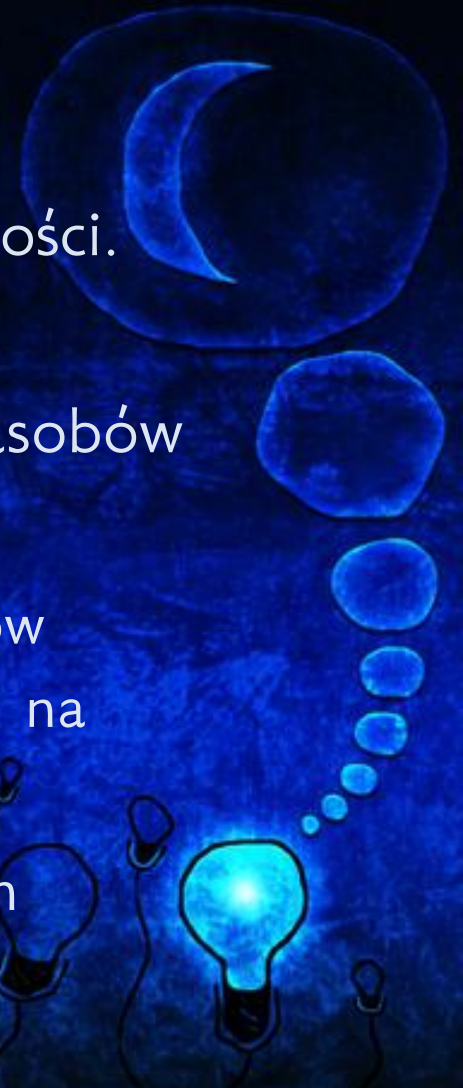
Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego II

- Określony poziom niezawodności systemu (bezpieczeństwa) R^* można uzyskać przy wielu alternatywnych kombinacjach wydatkowania (zużywania) zasobów.
- Na przykład: określoną niezawodność elektrowni można osiągnąć dzięki:
 - wyższym nakładom inwestycyjnym (wykorzystanie lepszych i droższych technologii, materiałów itp.)
 - lub wyższym kosztom eksploatacyjnym (wysoko kwalifikowany i wyżej płatny personel, zintensyfikowana profilaktyka planowa).



Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego III

- Krzywa jednakowej niezawodności przedstawia wszystkie ilościowe kombinacje n czynników, warunkujących niezawodność, skutkujące tym samym efektem w postaci poziomu niezawodności.
- Żadna z tych kombinacji nie jest lepsza od pozostałych, a wybór optymalnej kombinacji zasobów jest uwarunkowany dwoma czynnikami:
 - względną efektywnością poszczególnych zasobów lub sposobów ich zużywania (w sensie wpływu na niezawodność czy bezpieczeństwo),
 - względną wartością lub kosztem poszczególnych zasobów lub sposobów ich zużywania.



Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego IV

■ Niezawodność krańcowa R' względem zasobów X (gdzie $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ – wektor zasobów / środków) opisuje zmiany niezawodności systemu R , gdy podczas jego projektowania, budowy i eksploatacji są dodawane lub odejmowane jednostki poszczególnych zasobów.

■ W określonym punkcie:

$$R'_j = \frac{\partial R}{\partial X_j}$$

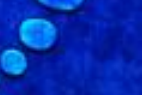
gdzie: R - niezawodność (bezpieczeństwo) wyrażone przez swą miarę (wskaźnik) o fizycznym lub innym charakterze (np. energia niedostarczona, częstość przerw w zasilaniu), X_j - j -ty zasób

Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego V

- Niezawodność krańcowa R' względem zasobów X gdy pochodne cząstkowe nie istnieją:

$$R'_j = \frac{\Delta R}{\Delta X_j}$$

- W większości przypadków niezawodność krańcowa maleje gdy X_j rośnie, co oznacza, że mierzony w kategoriach niezawodności (bezpieczeństwa) efekt (produkt) marginalny dowolnego zasobu maleje przy wzroście ilości zużywanego (wydatkowanego) zasobu i pozostającej bez zmian ilości pozostałych zasobów.

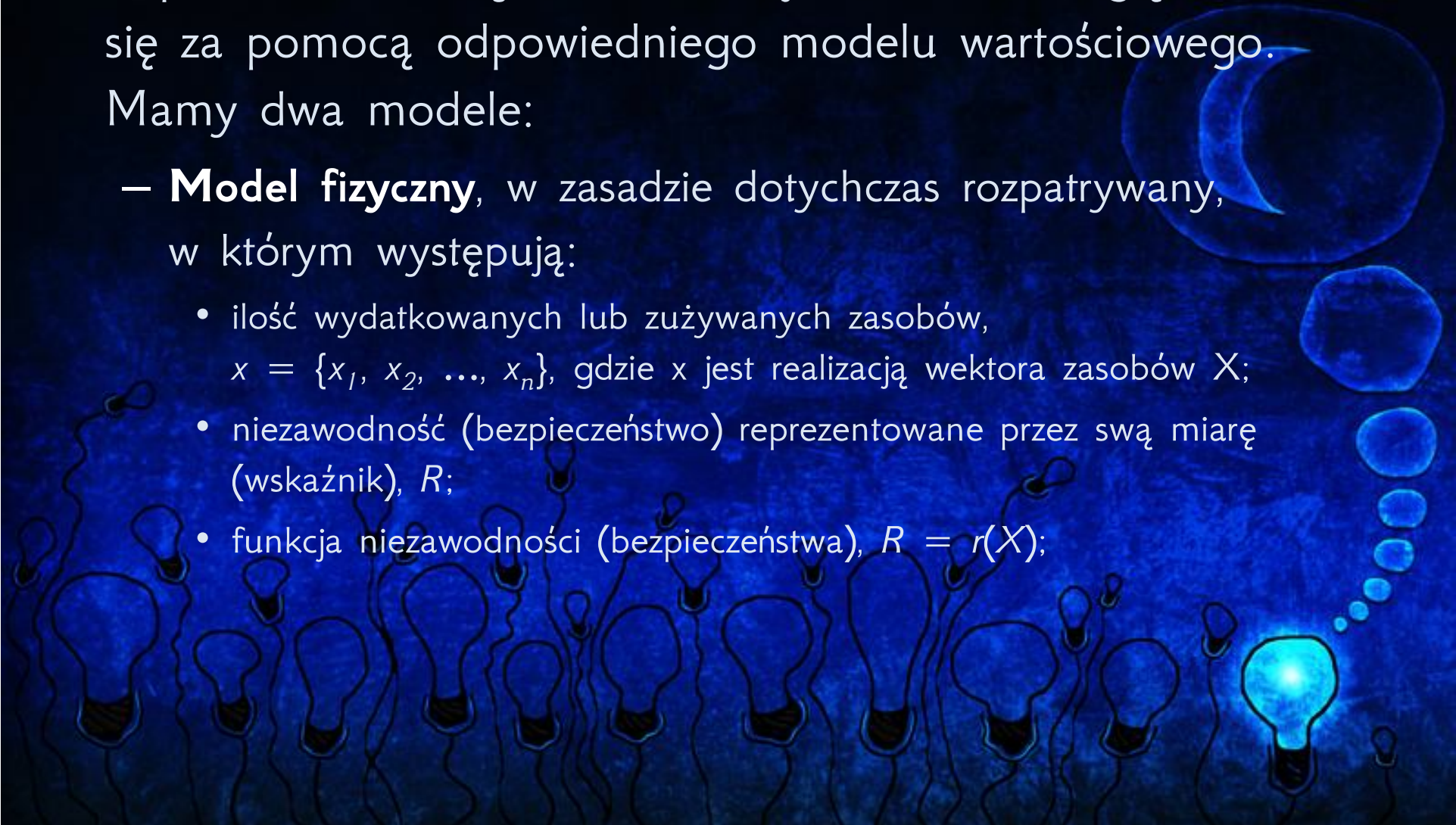


Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego VI

Aspekt wartościowy transformacji zasobów uwzględnia się za pomocą odpowiedniego modelu wartościowego.

Mamy dwa modele:

- **Model fizyczny**, w zasadzie dotychczas rozpatrywany, w którym występują:
 - ilość wydatkowanych lub zużywanych zasobów,
 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, gdzie x jest realizacją wektora zasobów X ;
 - niezawodność (bezpieczeństwo) reprezentowane przez swą miarę (wskaźnik), R ;
 - funkcja niezawodności (bezpieczeństwa), $R = r(X)$;



Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego VII

– **Model wartościowy**, w którym występują:

- wartość zasobów wydatkowanych lub zużywanych dla zapewnienia niezawodności (bezpieczeństwa), $W(X)$;
- wartość niezawodności (bezpieczeństwa), $W(R)$ lub skutki ekonomiczne niezadowolającego ich poziomu (straty gospodarcze i społeczne), $S(R)$;
- funkcja celu, określająca wartość (zysk) lub koszt transformacji zasobów X w niezawodność (bezpieczeństwo) R ,

$$Z = W(R^*) - W(X) \rightarrow \max$$

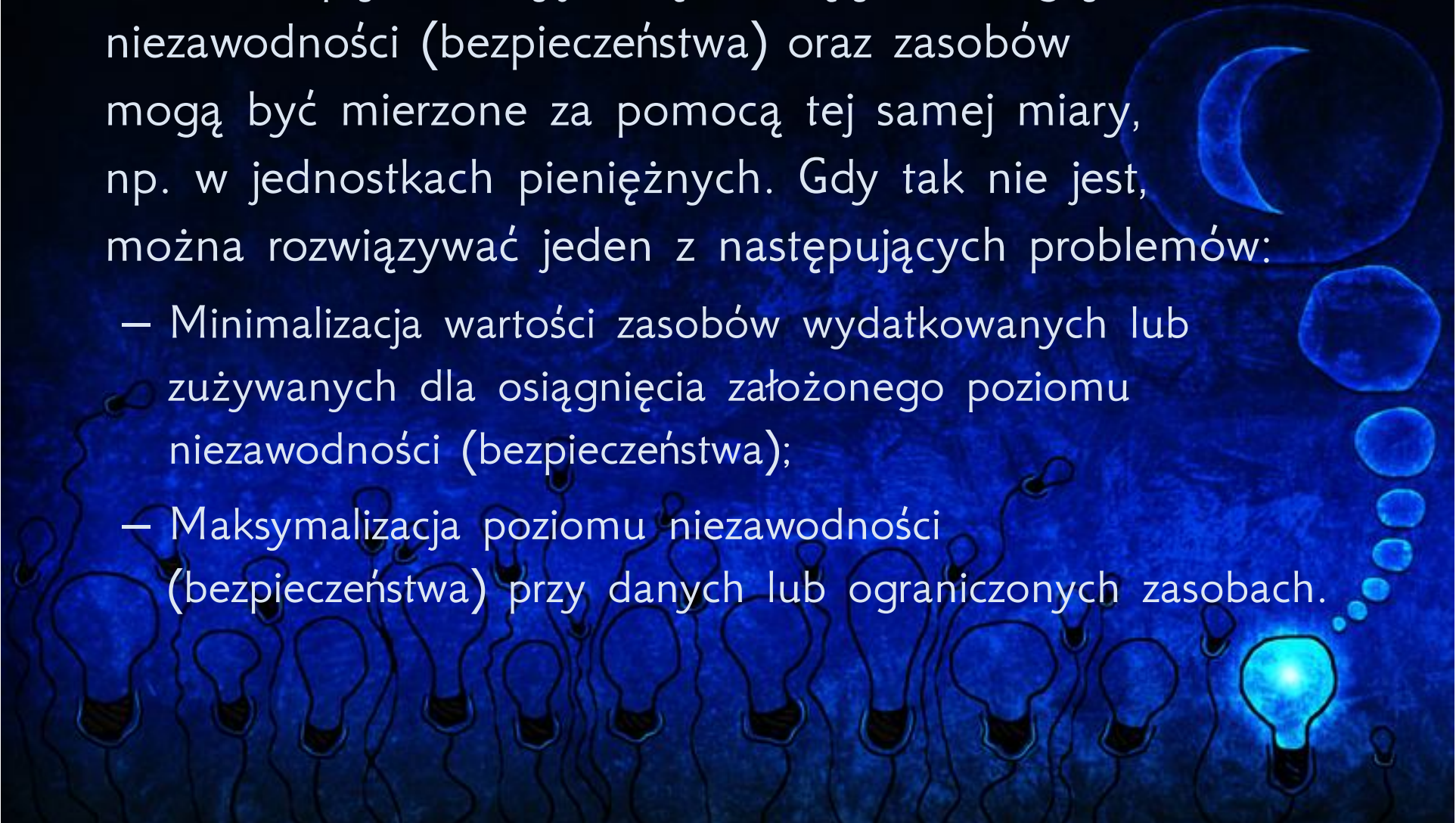
$$K = W(X) + S(R) \rightarrow \min$$

przy ograniczeniach typu: $R' \leq r(X)$

Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego VIII

 Zadania optymalizacyjne są rozwiązywalne, gdy wartości niezawodności (bezpieczeństwa) oraz zasobów mogą być mierzone za pomocą tej samej miary, np. w jednostkach pieniężnych. Gdy tak nie jest, można rozwiązywać jeden z następujących problemów:

- Minimalizacja wartości zasobów wydatkowanych lub zużywanych dla osiągnięcia założonego poziomu niezawodności (bezpieczeństwa);
- Maksymalizacja poziomu niezawodności (bezpieczeństwa) przy danych lub ograniczonych zasobach.



Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego IX

- Minimalizacja wartości zasobów wydatkowanych lub zużywanych dla osiągnięcia założonego poziomu niezawodności (bezpieczeństwa).

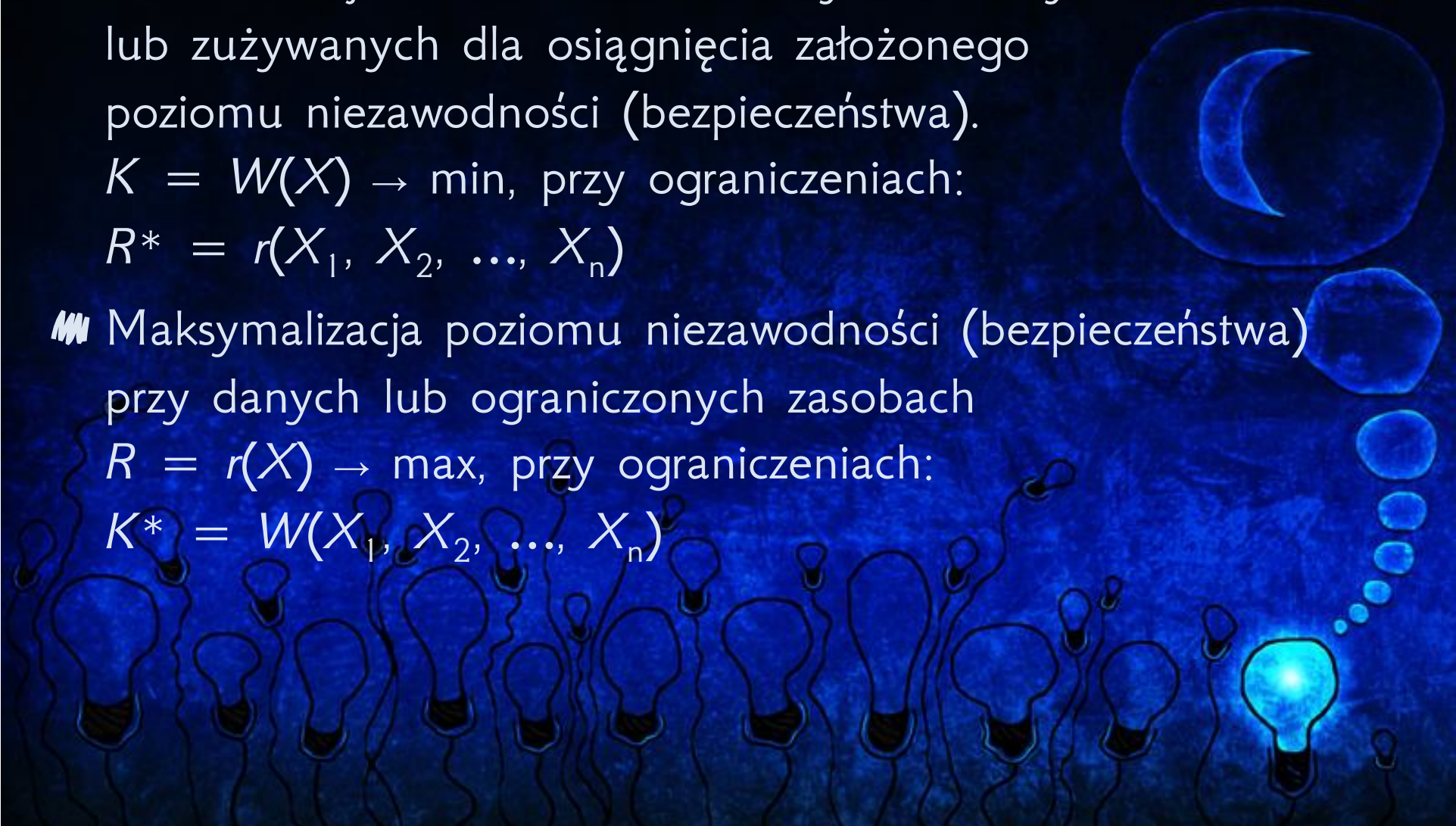
$K = W(X) \rightarrow \min$, przy ograniczeniach:

$$R^* = r(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

- Maksymalizacja poziomu niezawodności (bezpieczeństwa) przy danych lub ograniczonych zasobach

$R = r(X) \rightarrow \max$, przy ograniczeniach:

$$K^* = W(X_1, X_2, \dots, X_n)$$



Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego X

Stosując metodę mnożników Lagrange'a otrzymuje się następujące warunki istnienia ekstremum:

– dla minimalizacji wartości zasobów wydatkowanych lub zużywanych

$$\frac{R_i}{K_i} = \text{const.}, \text{ dla } i=1, 2, \dots, n;$$

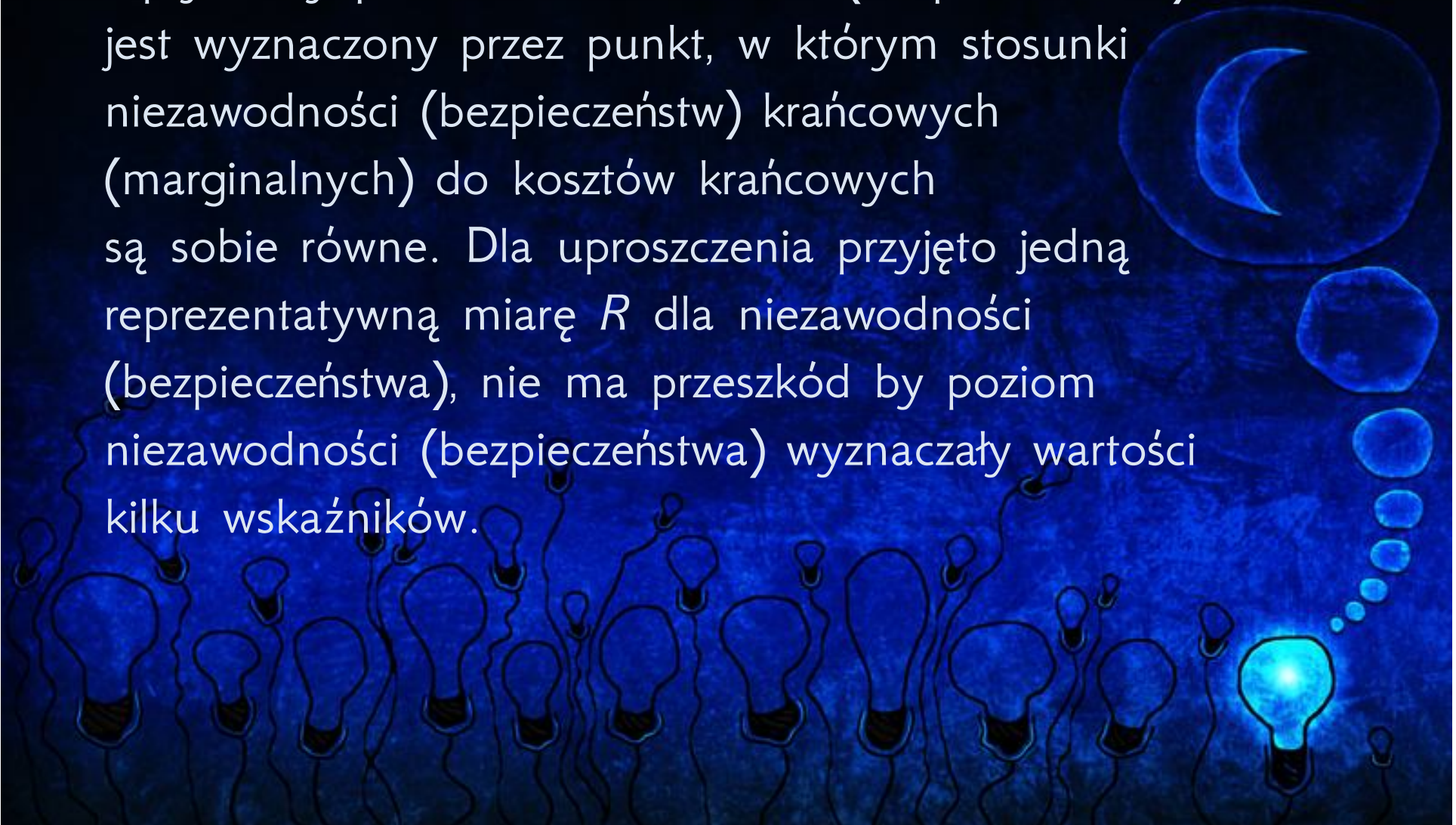
– dla maksymalizacji poziomu niezawodności

$$\frac{K_i}{R_i} = \text{const.}, \text{ dla } i=1, 2, \dots, n$$

gdzie: K_i – koszt krańcowy i -tego zasobu, rozumiany jako wartościowa miara przyrostu wydatkowania lub zużycia i -tego zasobu dla uzyskania wzrostu poziomu niezawodności (bezpieczeństwa) o jednostkę

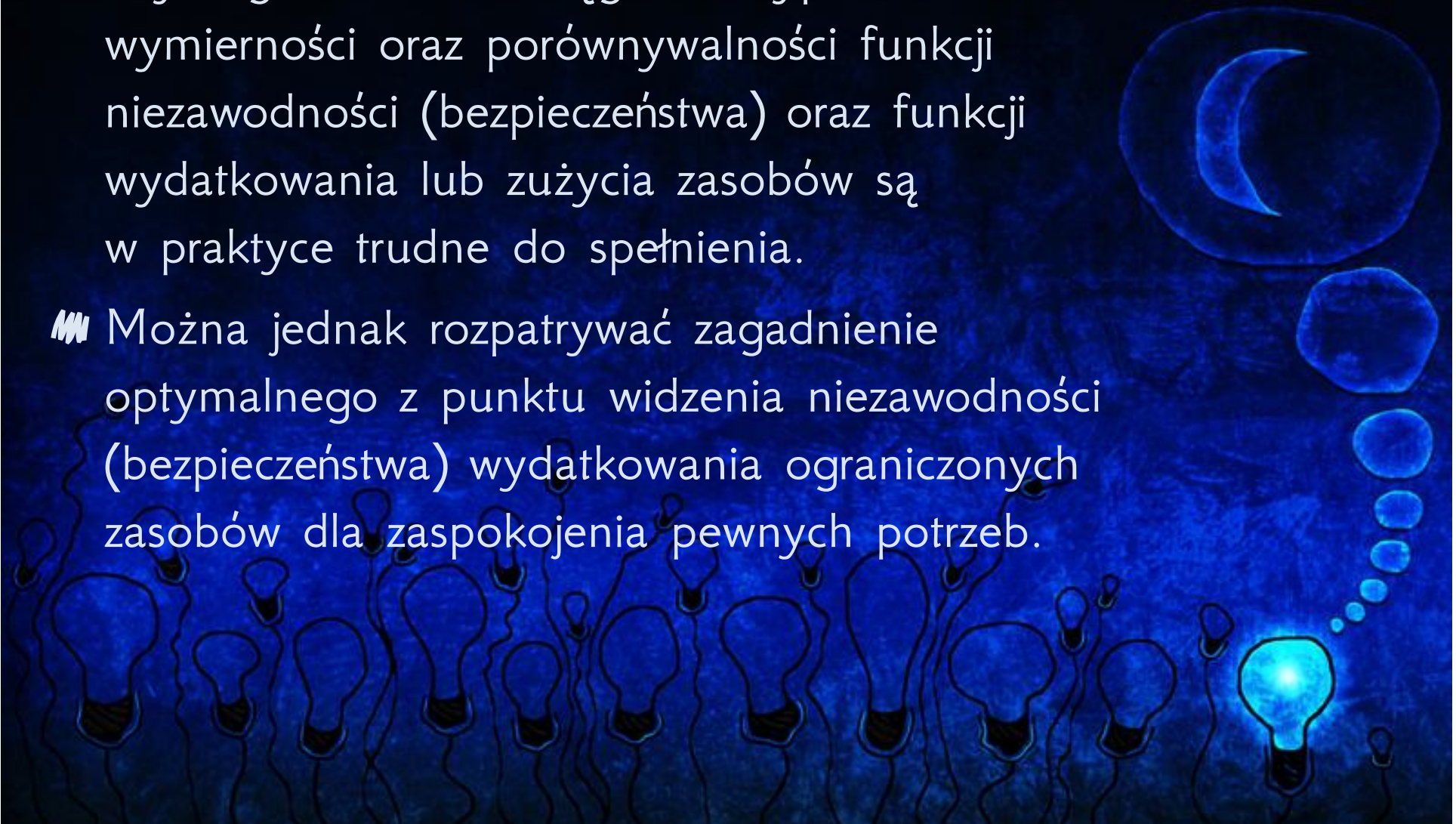
Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego XI

- Optymalny poziom niezawodności (bezpieczeństwa) jest wyznaczony przez punkt, w którym stosunki niezawodności (bezpieczeństw) krańcowych (marginalnych) do kosztów krańcowych są sobie równe. Dla uproszczenia przyjęto jedną reprezentatywną miarę R dla niezawodności (bezpieczeństwa), nie ma przeszkód by poziom niezawodności (bezpieczeństwa) wyznaczały wartości kilku wskaźników.



Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego XII

- Wymagania co do: ciągłości, wypukłości, wymierności oraz porównywalności funkcji niezawodności (bezpieczeństwa) oraz funkcji wydatkowania lub zużycia zasobów są w praktyce trudne do spełnienia.
- Można jednak rozpatrywać zagadnienie optymalnego z punktu widzenia niezawodności (bezpieczeństwa) wydatkowania ograniczonych zasobów dla zaspokojenia pewnych potrzeb.



Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego XIII

Można wyróżnić trzy warianty tego problemu:

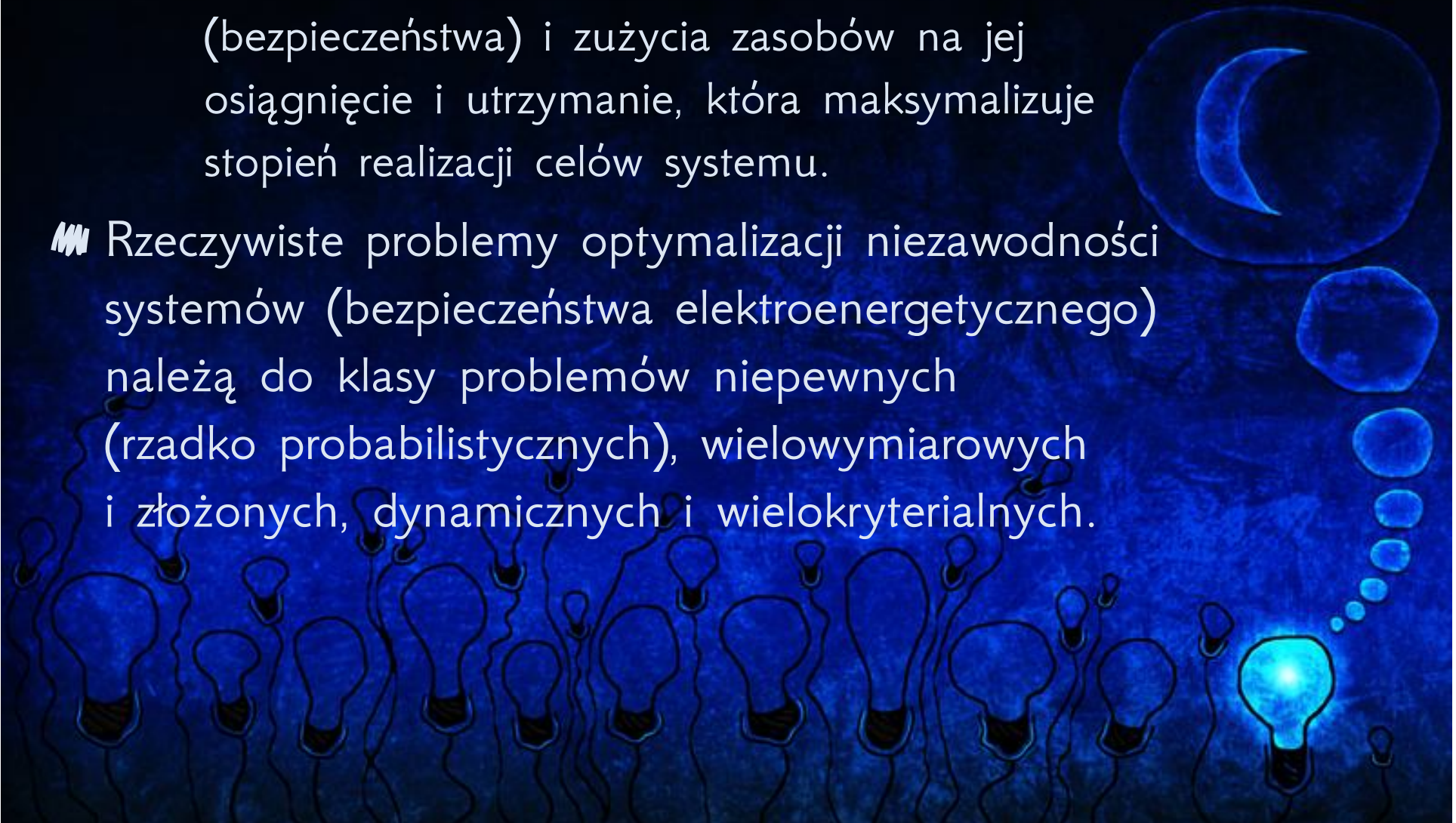
1. przy określonej wielkości zasobów oraz przy danych ograniczeniach technicznych należy maksymalizować niezawodność systemu (bezpieczeństwo elektroenergetyczne).
2. przy określonym wymaganym poziomie niezawodności systemu (bezpieczeństwa) oraz przy danych ograniczeniach technicznych należy minimalizować wydatkowanie lub zużycie zasobów niezbędnych do uzyskania i utrzymania niezawodności (bezpieczeństwa).



Ogólne sformułowanie zagadnienia optymalizacji bezpieczeństwa elektroenergetycznego XIV

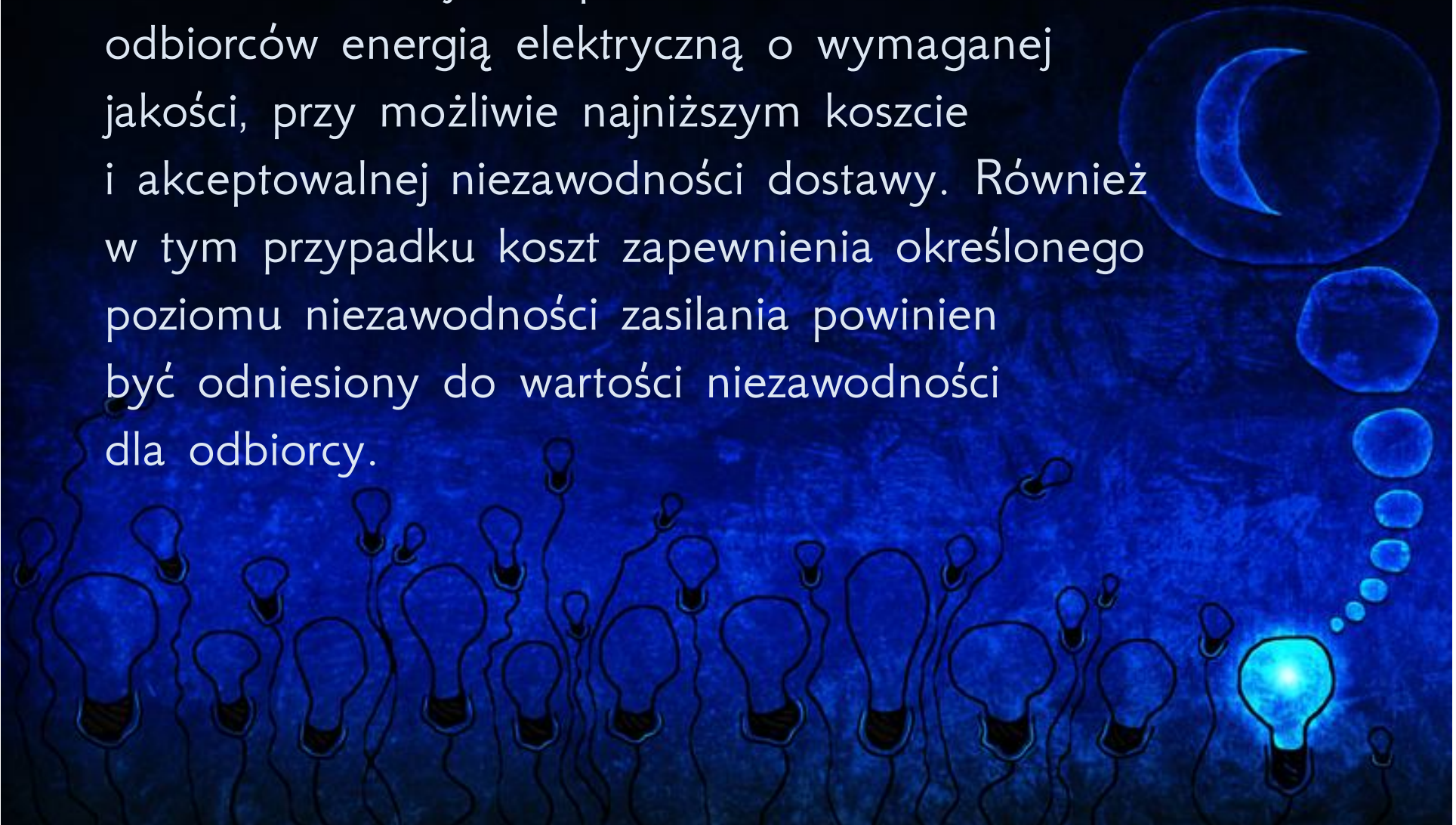
3. należy uzyskać taką kombinację niezawodności (bezpieczeństwa) i zużycia zasobów na jej osiągnięcie i utrzymanie, która maksymalizuje stopień realizacji celów systemu.

 Rzeczywiste problemy optymalizacji niezawodności systemów (bezpieczeństwa elektroenergetycznego) należą do klasy problemów niepewnych (rzadko probabilistycznych), wielowymiarowych i złożonych, dynamicznych i wielokryterialnych.



Optymalna niezawodność systemu elektroenergetycznego I

 Zadaniem SEE jest zapewnienie zasilania odbiorców energią elektryczną o wymaganej jakości, przy możliwie najniższym koszcie i akceptowalnej niezawodności dostawy. Również w tym przypadku koszt zapewnienia określonego poziomu niezawodności zasilania powinien być odniesiony do wartości niezawodności dla odbiorcy.



Optymalna niezawodność systemu elektroenergetycznego II

■ Dla systemu elektroenergetycznego funkcja celu, określająca wartość (zysk) lub koszt transformacji zasobów X w niezawodność (bezpieczeństwo) R przyjmuje postać:

$$Z(A, R) = WS(A, R) - K_{zap}(A, R) \rightarrow \max$$

$$K(A, R) = K_{zap}(A, R) + K_{str}(A, R) \rightarrow \min$$

- gdzie: $Z(A, R)$ – wartość społeczną (zysk) pokrywania zapotrzebowania (popytu) na energię elektryczną A z niezawodnością R ; $WS(A, R)$ – wartość sprzedaży energii w ilości A przy niezawodności R ; $K_{zap}(A, R)$ – koszty pokrywania popytu A z niezawodnością R , $K_{str}(A, R)$ – koszty strat wynikających z niedostatecznej niezawodności R , $K(A, R)$ – łączny (społeczny) koszt pokrywania popytu A z niezawodnością R .

Optymalna niezawodność systemu elektroenergetycznego III

Popyt A jest funkcją niezawodności R a wielkości ekonomiczne są wartościami rocznymi lub sumami wartości zdyskontowanych za cały wieloletni okres analizy.

Z warunku koniecznego na istnienie ekstremum wynika:

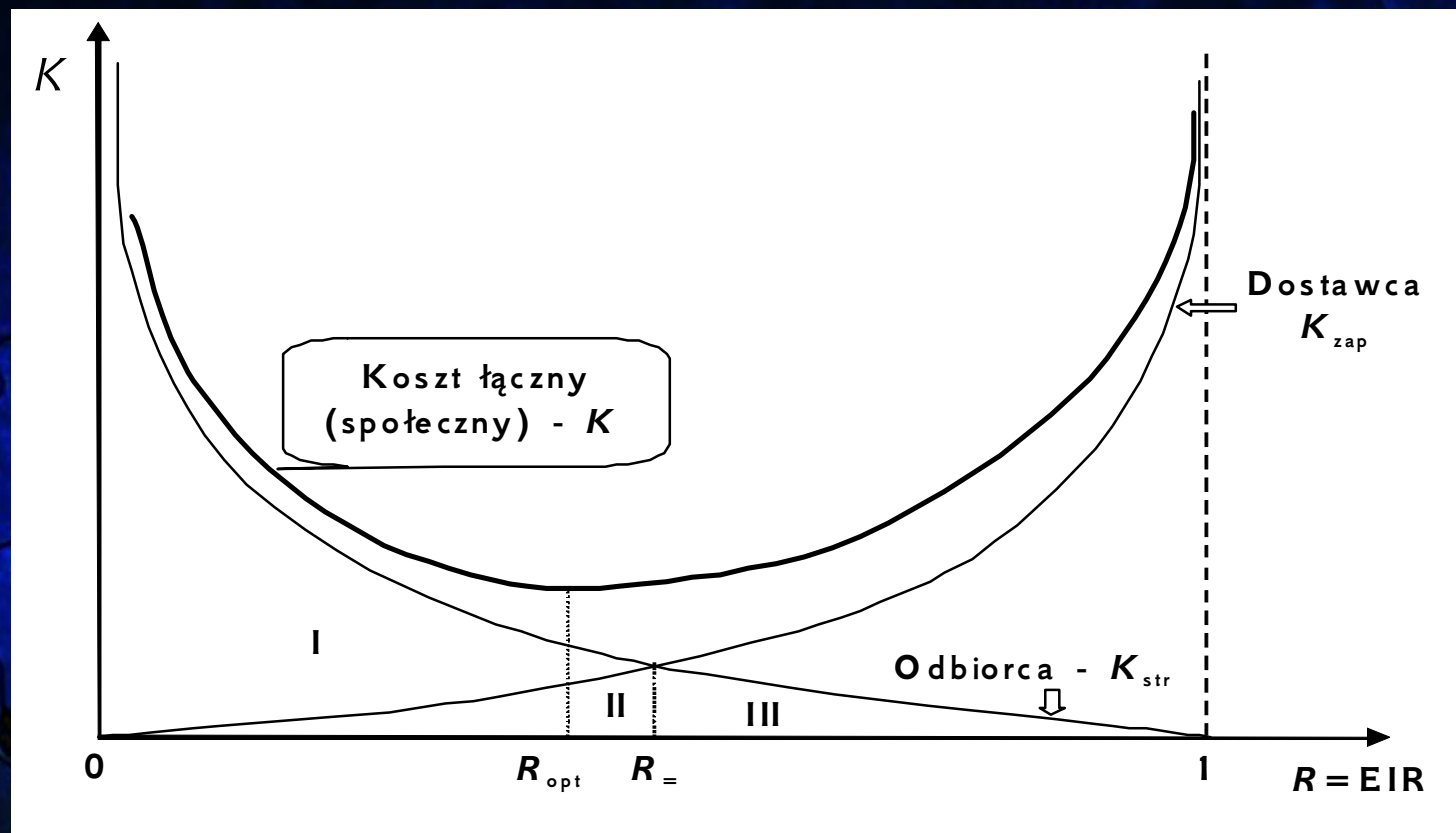
$$\frac{dZ}{dR} = 0 \rightarrow \frac{dWS}{dR} = \frac{dK_{zap}}{dR}, \quad \frac{dK}{dR} = 0 \rightarrow \frac{dK_{zap}}{dR} = -\frac{dK_{str}}{dR}$$

zatem, przy optymalnej niezawodności zachodzą odpowiednie równości krańcowych (marginalnych) wielkości ekonomicznych.

W praktyce zakłada się nieelastyczność popytu A względem niezawodności R .

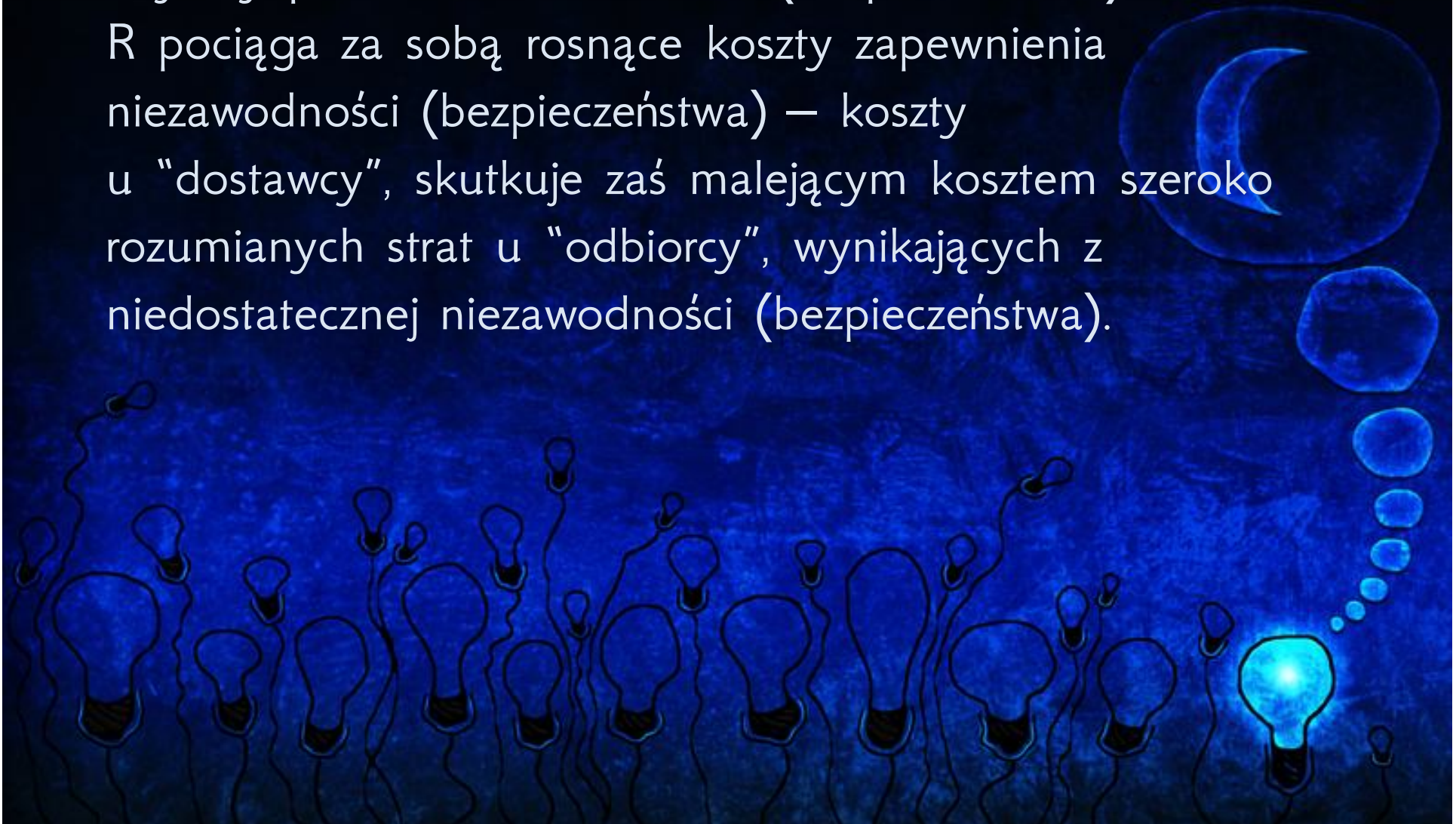
Optymalna niezawodność systemu elektroenergetycznego IV

Zakładamy, że poziom niezawodności R jest reprezentowany przez wskaźnik zapewnienia energii EIR



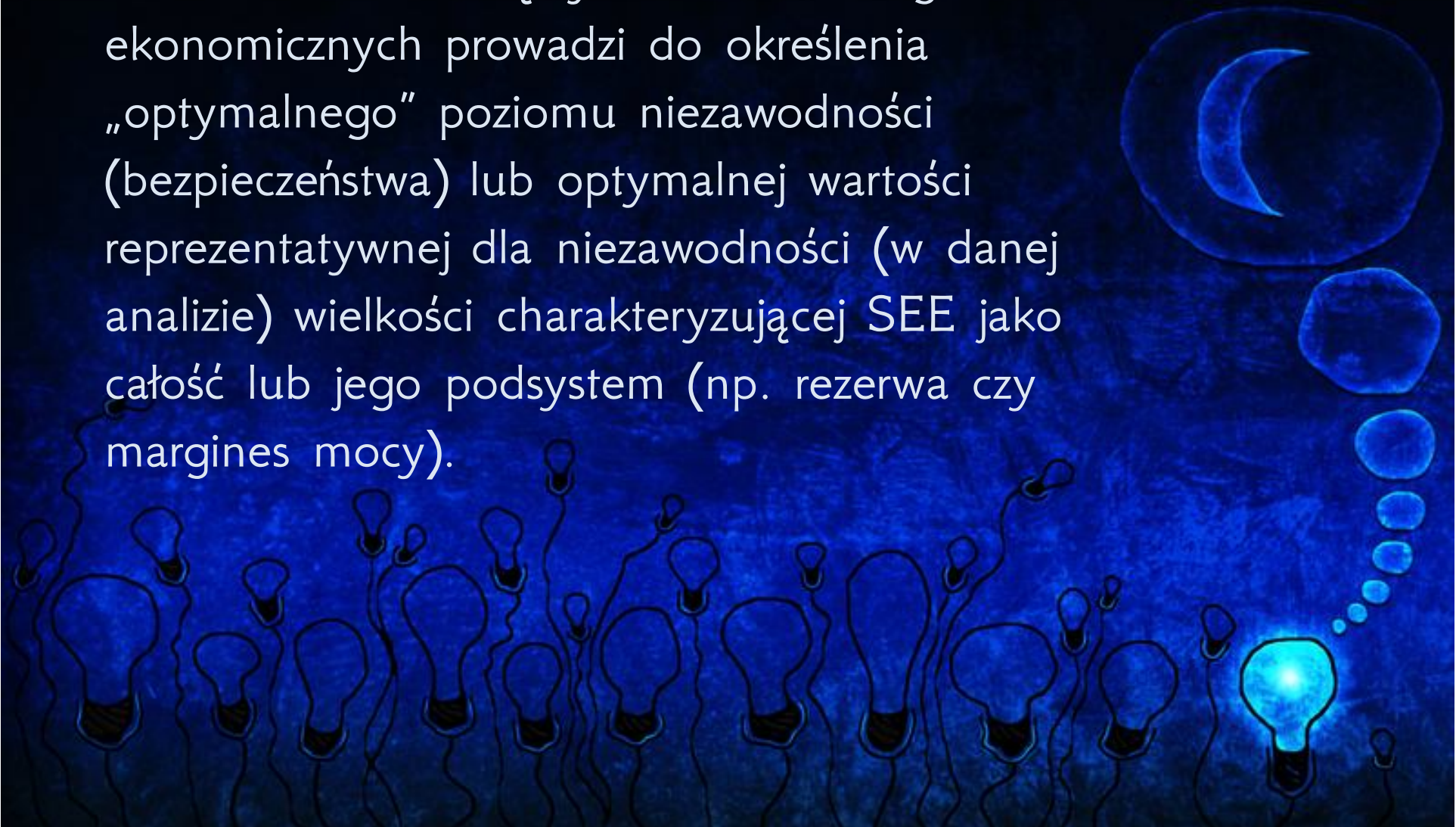
Optymalna niezawodność systemu elektroenergetycznego V

- Wyższy poziom niezawodności (bezpieczeństwa) R pociąga za sobą rosnące koszty zapewnienia niezawodności (bezpieczeństwa) – koszty u “dostawcy”, skutkuje zaś malejącym kosztem szeroko rozumianych strat u “odbiorcy”, wynikających z niedostatecznej niezawodności (bezpieczeństwa).



Optymalna niezawodność systemu elektroenergetycznego VI

- Zestawienie ze sobą tych dwóch kategorii ekonomicznych prowadzi do określenia „optimalnego” poziomu niezawodności (bezpieczeństwa) lub optymalnej wartości reprezentatywnej dla niezawodności (w danej analizie) wielkości charakteryzującej SEE jako całość lub jego podsystem (np. rezerwa czy margines mocy).



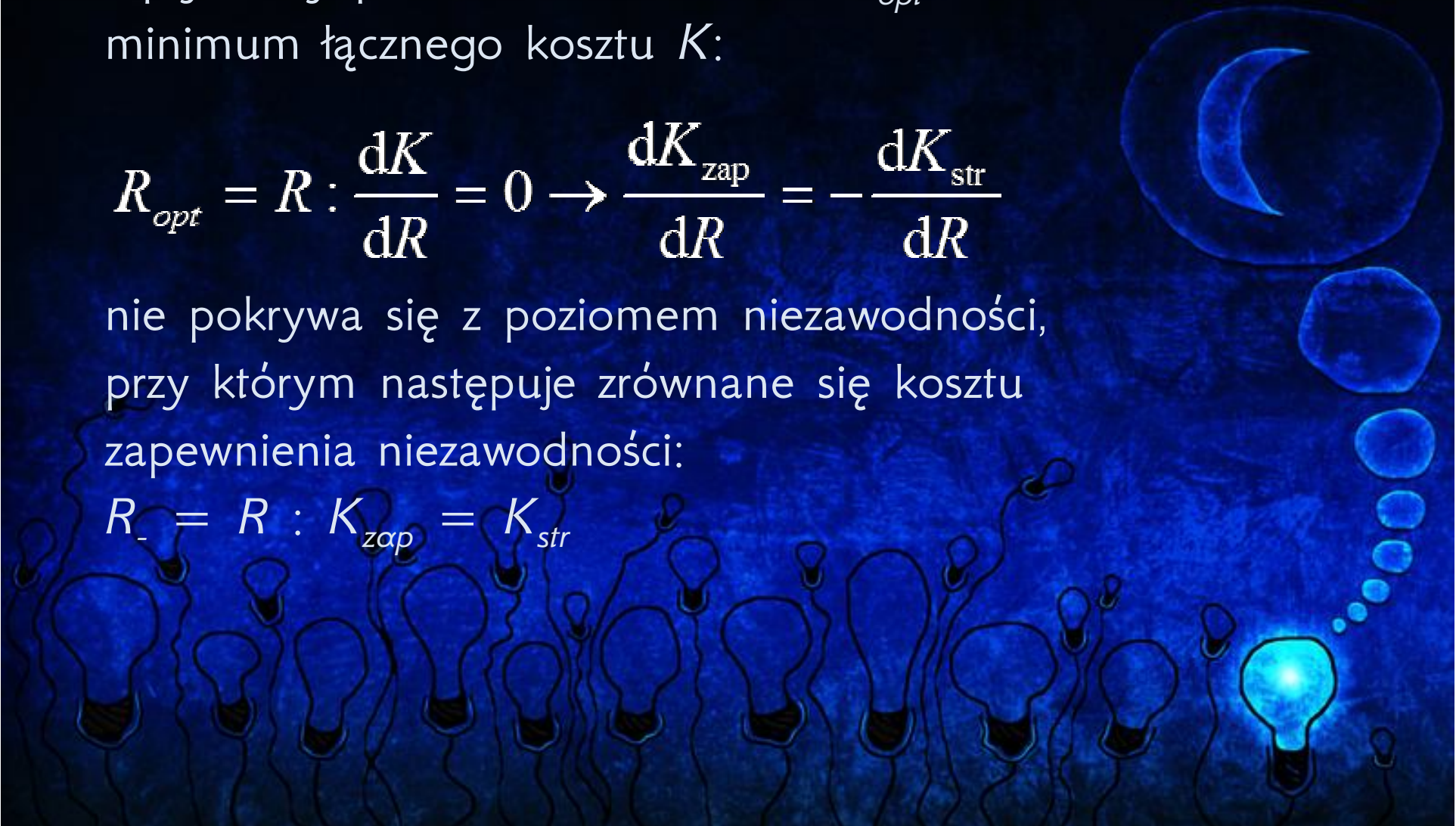
Optymalna niezawodność systemu elektroenergetycznego VII

Optymalny poziom niezawodności R_{opt} oznacza minimum łącznego kosztu K :

$$R_{opt} = R : \frac{dK}{dR} = 0 \rightarrow \frac{dK_{zap}}{dR} = -\frac{dK_{str}}{dR}$$

nie pokrywa się z poziomem niezawodności, przy którym następuje zrównanie się kosztu zapewnienia niezawodności:

$$R_{-} = R : K_{zap} = K_{str}$$



Optymalna niezawodność systemu elektroenergetycznego VIII

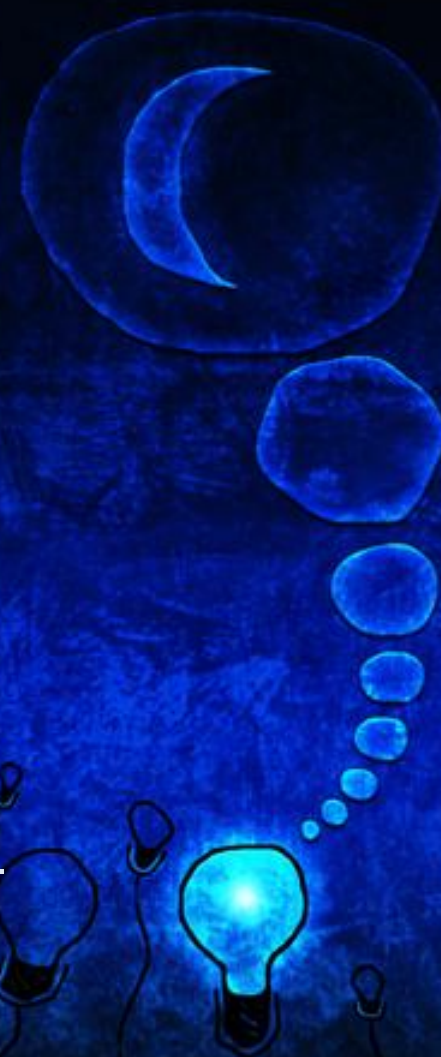
Można wyróżnić trzy obszary:

- I – obszar efektywności działań dla poprawy niezawodności, w którym działania te skutkują malejącym kosztem łącznym a tempo spadku kosztu strat jest wyższe od szybkości narastania kosztu zapewnienia niezawodności,
- II – obszar pośredni, w którym koszt łączny rośnie nieznacznie,
- III - obszar nieefektywności działań dla poprawy niezawodności z coraz szybszym wzrostem kosztu łącznego.



Koszty zawodności i ich wyznaczanie I

 Ocena strat ekonomicznych powodowanych zawodnością systemu elektroenergetycznego jest w szczególności niezbędna dla analizy alternatywnych planów rozwoju systemów sieciowych. Celowość podejmowania inwestycji podnoszących niezawodność systemu można ocenić na podstawie relacji kosztów i spodziewanych korzyści. Narzędziem w tak rozumianym planowaniu rozwoju systemu jest analiza koszt — korzyść, znana jako wartościowanie niezawodności (VBRA — Value-Based Reliability Approach).



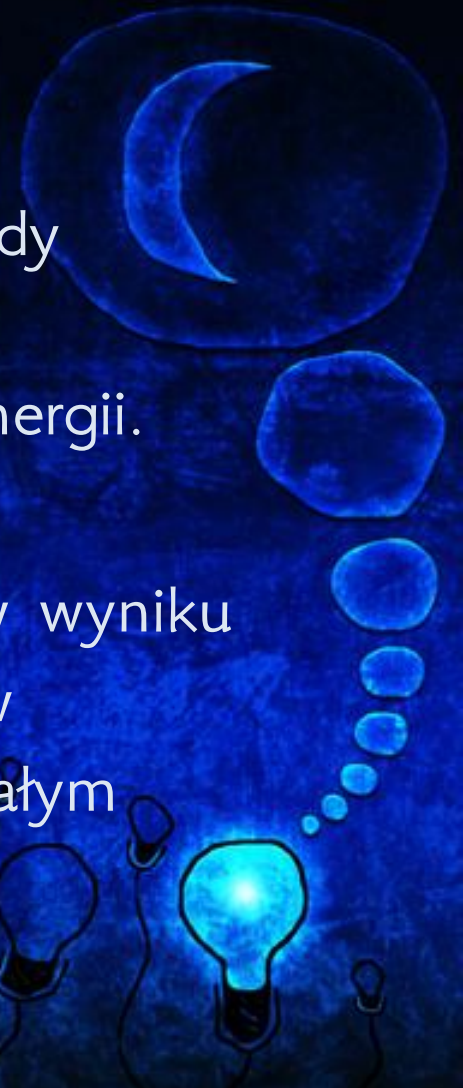
Koszty zawodności i ich wyznaczanie II

Całkowity koszt (zdyskontowany) jest określony zależnością:

$$K = K_{z\alpha p} + K_{str} = K_I + K_e + K_{ne}$$

gdzie: K - całkowity koszt wariantu, K_I - nakłady inwestycyjne wariantu, K_e - koszty operacyjne (eksploatacyjne), K_{ne} - koszt niedostarczonej energii.

Szukany jest wariant, o minimalne kosztach składających się z kosztów strat u odbiorców w wyniku przerw i ograniczeń oraz niezbędnych nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych w całym wieloletnim okresie eksploatacji.



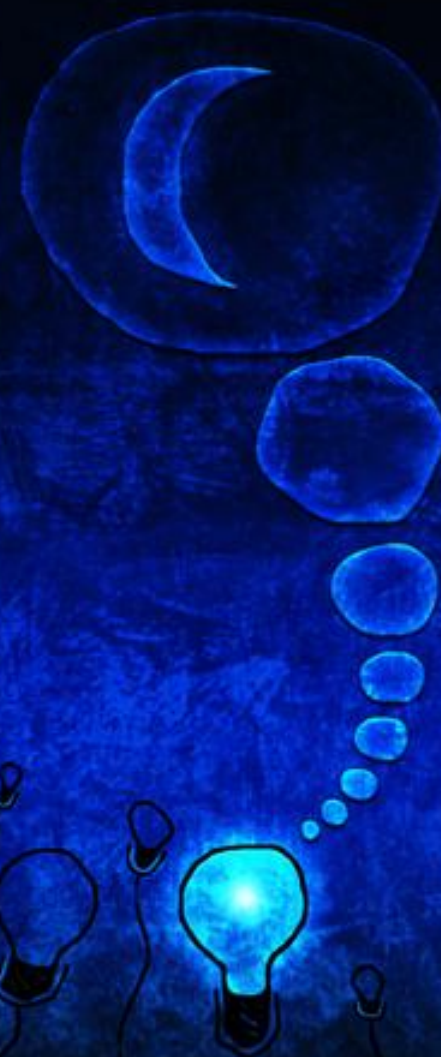
Koszty zawodności i ich wyznaczanie III

- Istotnym elementem, który wartościuje warianty rozbudowy, modernizacji i eksploatacji systemu elektroenergetycznego są straty wynikające z przerw i ograniczeń dostawy energii elektrycznej do odbiorców, które zostały określone w jako koszt niedostarczonej energii.
- Straty te są trudne do oszacowania, ponieważ nie ma prostej zależności między energią niedostarczoną a stratami gospodarczymi (szkodami) jakie poniesie odbiorca. Zależy to od wielu czynników, do ważniejszych można zaliczyć zmienną intensywność działania odbiorcy.



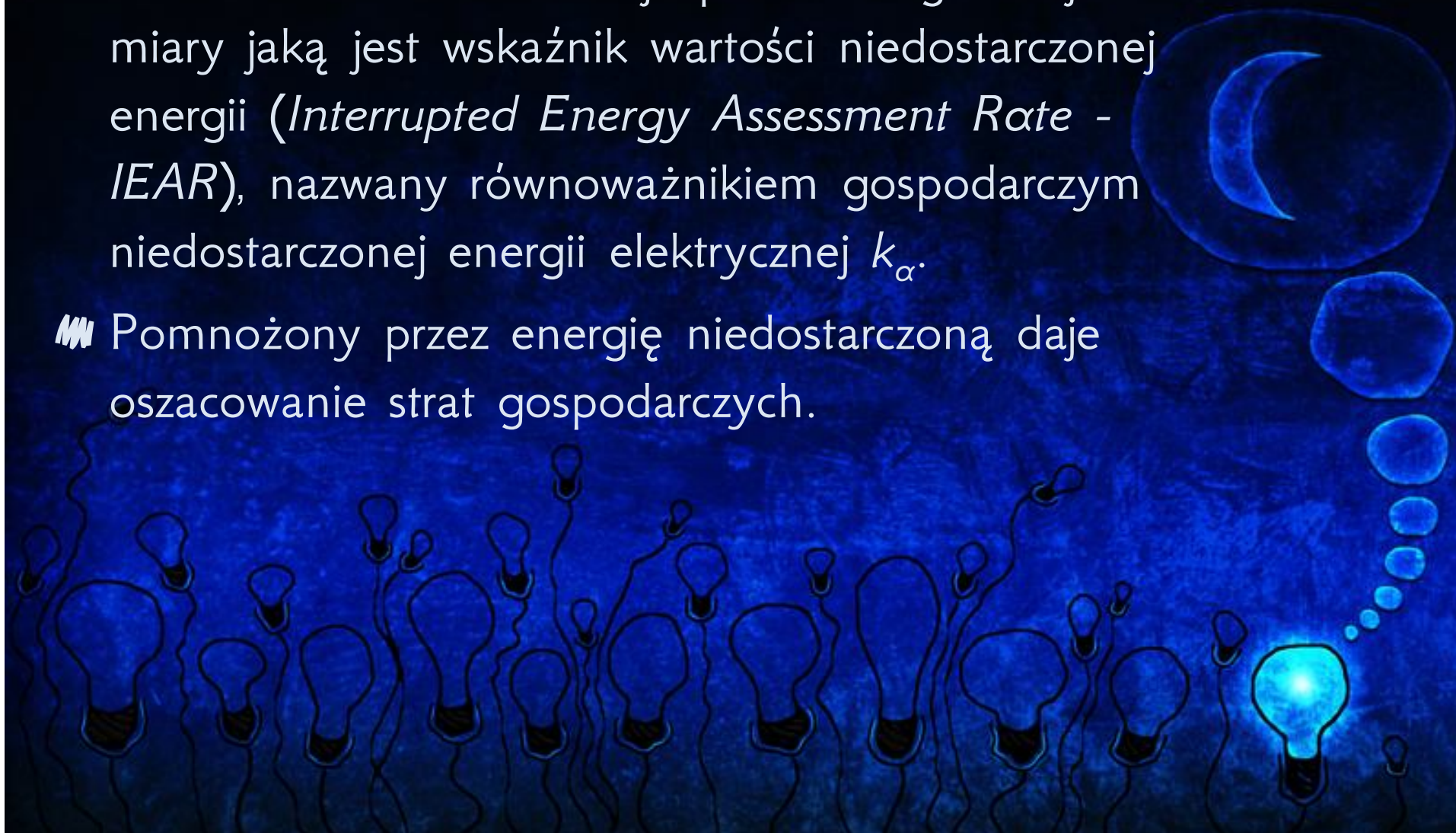
Koszty zawodności i ich wyznaczanie IV

- Straty gospodarcze powinna reprezentować wartość niedostarczonej energii elektrycznej oszacowana przez odbiorcę w szeroko zakrojonych badaniach ankietowych. Odbiorca udziela odpowiedzi na szereg pytań, w tym na pytanie: *jaką sumę miałby ochotę zapłacić, żeby w danych warunkach uniknąć przerwy zasilania?* Zwykle ustalana w ten sposób wartość energii niedostarczonej stanowi jej wartość krańcową dla przerwy
- o określonym czasie trwania,
 - w danych warunkach pracy i sytuacji



Koszty zawodności i ich wyznaczanie V

- Pomimo zastrzeżeń istnieje potrzeba zgrubnej miary jaką jest wskaźnik wartości niedostarczonej energii (*Interrupted Energy Assessment Rate - IEAR*), nazwany równoważnikiem gospodarczym niedostarczonej energii elektrycznej k_{α} .
- Pomnożony przez energię niedostarczoną daje oszacowanie strat gospodarczych.



Koszty zawodności i ich wyznaczanie VI

- Wystarczalność stosowania tego wskaźnika wynika m.in. stąd, że każda poprawa niezawodności układu elektroenergetycznego następuje skokowo.
- Przykład*
przejście z jednostronnego zasilania odbiorcy na dwustronne powoduje poprawę niezawodności rzędu kilkudziesięciu razy.
- Oznacza to znaczne złagodzenie wymagań co do dokładności w oszacowaniu strat gospodarczych spowodowanych przerwami zasilania — mogą wystarczyć tylko wartości przybliżone.



Koszty zawodności i ich wyznaczanie VII

Badania i analizy prowadzone dla grup odbiorców dostarczają informacji o kosztach na "przerwę/zakłócenie" a nie o kosztach na "kW mocy wyłączonej lub ograniczonej", czy na "kW·h energii niedostarczonej". Są one następnie przetwarzane do postaci "koszt/kW" lub "koszt/(kW·h)" i podawane dla wyróżnionych grup odbiorców i charakterystycznych wartości czasu trwania przerwy w zasilaniu.



Koszty zawodności i ich wyznaczanie VIII

W badaniach przeprowadzonych w latach 80-tych przez University of Saskatchewan dla Kanady wyróżniono 7 grup odbiorców: wielcy odbiorcy, przemysł, handel i usługi, rolnictwo, gospodarstwa domowe, instytucje rządowe i użyteczności publicznej, biura i budynki; oraz 5 charakterystycznych wartości czasu trwania przerwy w zasilaniu: 1 min, 20 min, 1 h, 4h, 8 h. Otrzymane wartości określają tzw. sektorową funkcję kosztu strat odbiorcy (*SCDF - Sector Customer Damage Function*) i mogą być wykorzystane do analiz na trzecim poziomie hierarchicznym SEE - HL III.



Koszty zawodności i ich wyznaczanie IX

 Badania wykonane w Wielkiej Brytanii na obszarze trzech spółek dystrybucyjnych (Manweb, MEB, Norweb) w okresie X 1992 - III 1993. Określono SCDF dla czterech wyróżnionych grup odbiorców: gospodarstwa domowe, handel i usługi, przemysł, wielcy odbiorcy (powyżej 8 MW) oraz siedmiu charakterystycznych wartości czasu trwania przerwy: przerwa chwilowa, 1 min, 20 min, 1 h, 4 h, 8 h, 24 h.

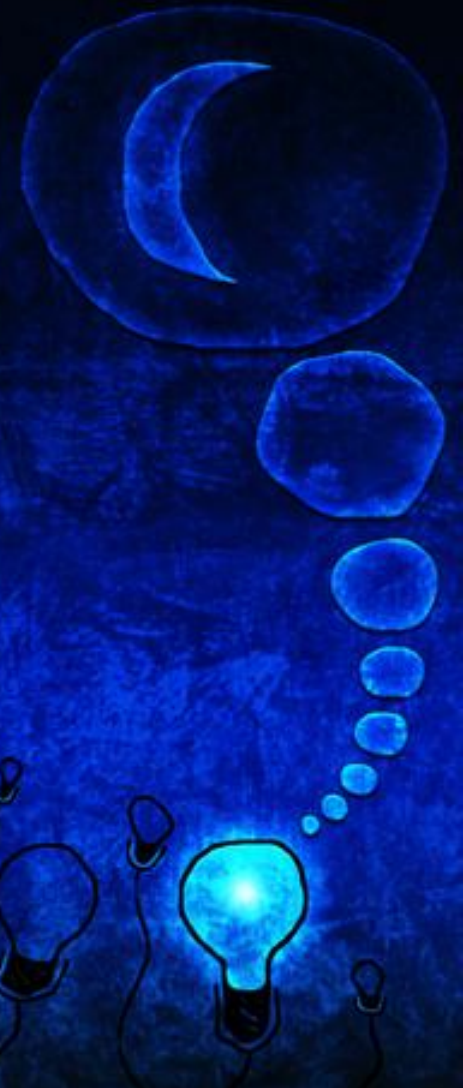


Koszty zawodności i ich wyznaczanie X

- Do analiz na drugim poziomie hierarchicznym SEE - HL II potrzebna jest zunifikowana funkcją kosztu strat odbiorców (*CCDF - Composite Customer Damage Function*), określająca koszty strat, w wyniku przerw i ograniczeń w zasilaniu, odbiorców pewnego obszaru [$\$/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $\text{zł}/(\text{kW}\cdot\text{h})$] w funkcji czasu trwania zakłócenia. Dla jej budowy są potrzebne funkcje SCDF wyróżnionych grup odbiorców i udziały tych grup w zapotrzebowaniu na energię. Można także określić koszty przypadające na zakłócenie i na jednostkę energii niedostarczonej.

Koszty zawodności i ich wyznaczanie XI

- W analizach SEE na poziomach HL I i HL II jest wykorzystywany wskaźnik globalny, znany jako wskaźnik wartości niedostarczonej energii (IEAR), zwany w Polsce gospodarczym równoważnikiem niedostarczonej energii elektrycznej [$\text{USD}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $\text{zł}/(\text{kW}\cdot\text{h})$]
- Pomnożony przez wartość oczekiwaną energii niedostarczonej LOEE/EENS/EUE daje ocenę kosztu społecznego strat wynikłych z niedostatecznej niezawodności
- Do wyznaczenia IEAR można wykorzystać funkcje CCDF lub SCDF



Koszty zawodności i ich wyznaczanie XII

Możliwą do wykorzystania wartością orientacyjną dla gospodarczego równoważnika niedostarczonej energii elektrycznej jest stosunek produktu krajowego brutto (PKB) do zużycia energii elektrycznej ogółem (EE) - w "Statystyce elektroenergetyki polskiej" podawana jest odwrotność tej relacji (EE/PKB).

Tak wyznaczone wartości wskaźnika wartości niedostarczonej energii elektrycznej (k_{α} – IEAR) są następujące (w PLN/(MW·h) i cenach 2005 r.):

1995 r.	2000 r.	2005 r.	2006 r.	2007 r.	2008 r.
4770	6090	6729	6925	7220	7570