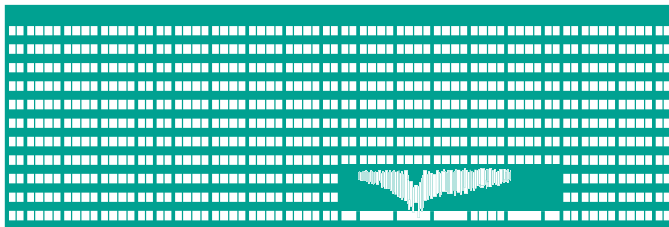


VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

VSB TECHNICAL
UNIVERSITY
OF OSTRAVA



www.vsb.cz

Aplikace umělé inteligence a kvantového počítání v energetice

Kvantová optimalizace propojení komunitní sítě

Jiří Tomčala

VSB – Technical University of Ostrava

jiri.tomcala@vsb.cz

12. listopadu, 2025

- 1 Komunitní energetika
- 2 Jednoduchý konkrétní příklad
- 3 Sestavení optimalizačního problému pro QUBO
- 4 Řešení pomocí QAOA
- 5 Konkrétní zadání
- 6 Výsledky kvantové optimalizace
- 7 Závěr

Komunitní energetika

Výhody komunitní energetiky



- **Větší energetická soběstačnost:** díky komunitní energetice nebudou lidé a firmy úplně odkázáni na tradiční dodávku elektřiny z distribuční soustavy.
- **Cena:** sdílené elektřiny je určována členy komunitní skupiny - může být i výrazně nižší než ta od dodavatele.
- **Vyšší dotace na fotovoltaiku:** od února 2025 je zapojení do sdílení elektřiny podmínkou pro získání vyšší dotace na fotovoltaiku v programu Nová zelená úsporám. Členové komunitní skupiny mají nárok na podporu až 140 000 Kč. Kdo nesdílí, získá dotaci pouze ve výši maximálně 100 000 Kč.
- **Lepší využití potenciálu obnovitelných zdrojů:** mnoho majitelů rodinných domů nedokáže veškerou vyrobenou elektřinu ze své fotovoltaiky spotřebovat. Díky komunitní energetice ji tak mohou sdílet s dalšími lidmi, například s rodinou, a využít tak potenciál výroby naplno.
- **Šetrnost k životnímu prostředí:** komunitní energetika je založená na výrobě především čisté energie, ze zdrojů, které nikdy nevyčerpáme - slunce, větru nebo vody. Přispívá proto k dekarbonizaci a urychluje přechod od fosilních paliv k nízkoemisním a bezemisním zdrojům.

Výhody komunitní energetiky



- **Větší energetická soběstačnost:** díky komunitní energetice nebudou lidé a firmy úplně odkázáni na tradiční dodávku elektřiny z distribuční soustavy.
- **Cena:** sdílené elektřiny je určována členy komunitní skupiny - může být i výrazně nižší než ta od dodavatele.
- **Vyšší dotace na fotovoltaiku:** od února 2025 je zapojení do sdílení elektřiny podmínkou pro získání vyšší dotace na fotovoltaiku v programu Nová zelená úsporám. Členové komunitní skupiny mají nárok na podporu až 140 000 Kč. Kdo nesdílí, získá dotaci pouze ve výši maximálně 100 000 Kč.
- **Lepší využití potenciálu obnovitelných zdrojů:** mnoho majitelů rodinných domů nedokáže veškerou vyrobenou elektřinu ze své fotovoltaiky spotřebovat. Díky komunitní energetice ji tak mohou sdílet s dalšími lidmi, například s rodinou, a využít tak potenciál výroby naplno.
- **Šetrnost k životnímu prostředí:** komunitní energetika je založená na výrobě především čisté energie, ze zdrojů, které nikdy nevyčerpáme - slunce, větru nebo vody. Přispívá proto k dekarbonizaci a urychluje přechod od fosilních paliv k nízkoemisním a bezemisním zdrojům.

Výhody komunitní energetiky



- **Větší energetická soběstačnost:** díky komunitní energetice nebudou lidé a firmy úplně odkázáni na tradiční dodávku elektřiny z distribuční soustavy.
- **Cena:** sdílené elektřiny je určována členy komunitní skupiny - může být i výrazně nižší než ta od dodavatele.
- **Vyšší dotace na fotovoltaiku:** od února 2025 je zapojení do sdílení elektřiny podmínkou pro získání vyšší dotace na fotovoltaiku v programu Nová zelená úsporám. Členové komunitní skupiny mají nárok na podporu až 140 000 Kč. Kdo nesdílí, získá dotaci pouze ve výši maximálně 100 000 Kč.
- **Lepší využití potenciálu obnovitelných zdrojů:** mnoho majitelů rodinných domů nedokáže veškerou vyrobenou elektřinu ze své fotovoltaiky spotřebovat. Díky komunitní energetice ji tak mohou sdílet s dalšími lidmi, například s rodinou, a využít tak potenciál výroby naplno.
- **Šetrnost k životnímu prostředí:** komunitní energetika je založená na výrobě především čisté energie, ze zdrojů, které nikdy nevyčerpáme - slunce, větru nebo vody. Přispívá proto k dekarbonizaci a urychluje přechod od fosilních paliv k nízkoemisním a bezemisním zdrojům.

Výhody komunitní energetiky



- **Větší energetická soběstačnost:** díky komunitní energetice nebudou lidé a firmy úplně odkázáni na tradiční dodávku elektřiny z distribuční soustavy.
- **Cena:** sdílené elektřiny je určována členy komunitní skupiny - může být i výrazně nižší než ta od dodavatele.
- **Vyšší dotace na fotovoltaiku:** od února 2025 je zapojení do sdílení elektřiny podmínkou pro získání vyšší dotace na fotovoltaiku v programu Nová zelená úsporám. Členové komunitní skupiny mají nárok na podporu až 140 000 Kč. Kdo nesdílí, získá dotaci pouze ve výši maximálně 100 000 Kč.
- **Lepší využití potenciálu obnovitelných zdrojů:** mnoho majitelů rodinných domů nedokáže veškerou vyrobenou elektřinu ze své fotovoltaiky spotřebovat. Díky komunitní energetice ji tak mohou sdílet s dalšími lidmi, například s rodinou, a využít tak potenciál výroby naplno.
- **Šetrnost k životnímu prostředí:** komunitní energetika je založená na výrobě především čisté energie, ze zdrojů, které nikdy nevyčerpáme - slunce, větru nebo vody. Přispívá proto k dekarbonizaci a urychluje přechod od fosilních paliv k nízkoemisním a bezemisním zdrojům.

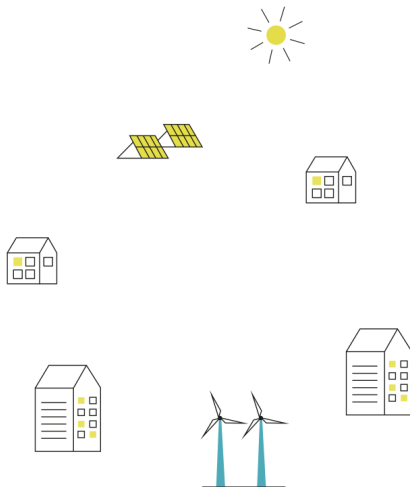
Výhody komunitní energetiky



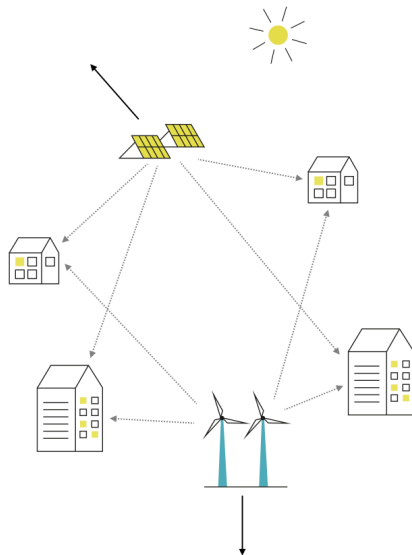
- **Větší energetická soběstačnost:** díky komunitní energetice nebudou lidé a firmy úplně odkázáni na tradiční dodávku elektřiny z distribuční soustavy.
- **Cena:** sdílené elektřiny je určována členy komunitní skupiny - může být i výrazně nižší než ta od dodavatele.
- **Vyšší dotace na fotovoltaiku:** od února 2025 je zapojení do sdílení elektřiny podmínkou pro získání vyšší dotace na fotovoltaiku v programu Nová zelená úsporám. Členové komunitní skupiny mají nárok na podporu až 140 000 Kč. Kdo nesdílí, získá dotaci pouze ve výši maximálně 100 000 Kč.
- **Lepší využití potenciálu obnovitelných zdrojů:** mnoho majitelů rodinných domů nedokáže veškerou vyrobenou elektřinu ze své fotovoltaiky spotřebovat. Díky komunitní energetice ji tak mohou sdílet s dalšími lidmi, například s rodinou, a využít tak potenciál výroby naplno.
- **Šetrnost k životnímu prostředí:** komunitní energetika je založená na výrobě především čisté energie, ze zdrojů, které nikdy nevyčerpáme - slunce, větru nebo vody. Přispívá proto k dekarbonizaci a urychluje přechod od fosilních paliv k nízkoemisním a bezemisním zdrojům.

Jednoduchý konkrétní příklad

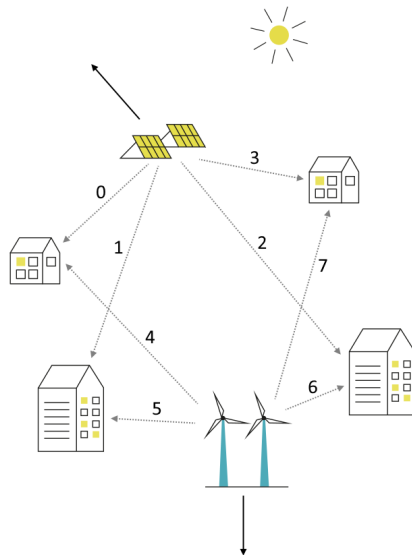
Jednoduchý konkrétní příklad



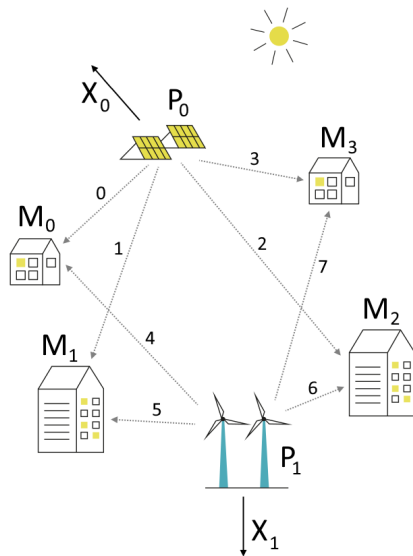
Jednoduchý konkrétní příklad



Jednoduchý konkrétní příklad



Jednoduchý konkrétní příklad



Sestavení optimalizačního problému pro QUBO

(Quadratic Unconstrained Binary Optimization)



Sestavení cenové funkce

Binární proměnná c_i představuje realizaci propojení i .

$$c_i \in \{0, 1\} \quad c_i^2 = c_i$$

$$P_0 = c_0 M_0 + c_1 M_1 + c_2 M_2 + c_3 M_3 + X_0$$

$$P_1 = c_4 M_0 + c_5 M_1 + c_6 M_2 + c_7 M_3 + X_1$$

Cenová funkce: $f_c(\mathbf{c}) = X_0^2(\mathbf{c}) + X_1^2(\mathbf{c}) \quad \mathbf{c}_{opt} = \arg \min(f_c(\mathbf{c}))$

$$X_0^2(\mathbf{c}) = (c_0 M_0 + c_1 M_1 + c_2 M_2 + c_3 M_3 - P_0)^2$$

$$X_1^2(\mathbf{c}) = (c_4 M_0 + c_5 M_1 + c_6 M_2 + c_7 M_3 - P_1)^2$$

$$\begin{aligned} f_c(\mathbf{c}) = & 2M_0M_1c_0c_1 + 2M_0M_2c_0c_2 + 2M_0M_3c_0c_3 + 2M_1M_2c_1c_2 + 2M_1M_3c_1c_3 + \\ & 2M_2M_3c_2c_3 + 2M_0M_1c_4c_5 + 2M_0M_2c_4c_6 + 2M_0M_3c_4c_7 + 2M_1M_2c_5c_6 + 2M_1M_3c_5c_7 + \\ & 2M_2M_3c_6c_7 + M_0(M_0 - P_0)c_0 + M_1(M_1 - P_0)c_1 + M_2(M_2 - P_0)c_2 + M_3(M_3 - P_0)c_3 + \\ & M_0(M_0 - P_1)c_4 + M_1(M_1 - P_1)c_5 + M_2(M_2 - P_1)c_6 + M_3(M_3 - P_1)c_7 + P_0^2 + P_1^2 \end{aligned}$$

Určení parametrů pro QUBO



$f_c(c)$ koeficienty pro QUBO:

kvadratické:

$$c_0 c_1 : 2M_0 M_1 \quad \dots \quad c_2 c_3 : 2M_2 M_3$$

$$c_4 c_5 : 2M_0 M_1 \quad \dots \quad c_6 c_7 : 2M_2 M_3$$

lineární:

$$c_0 : M_0(M_0 - P_0) \quad \dots \quad c_3 : M_3(M_3 - P_0)$$

$$c_4 : M_0(M_0 - P_1) \quad \dots \quad c_7 : M_3(M_3 - P_1)$$

$$\text{konstantní: } P_0^2 + P_1^2$$

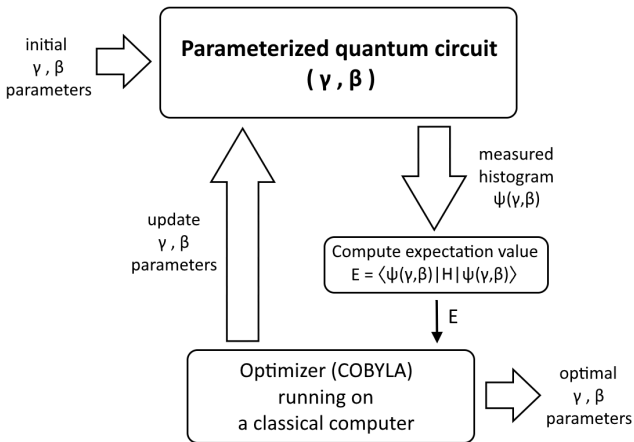
Řešení pomocí QAOA

(Quantum Approximate Optimization Algorithm)

Variational Quantum Circuit (VQC)



Zakódujeme cenovou funkci $f_c(c)$ do parametrizovaného kvantového obvodu PQC, kterému se někdy říká *ansatz*, a sestavíme variační kvantový obvod VQC (viz schéma), pomocí něhož pak najdeme hledané minimum.



Sestavení cenového Hamiltoniánu

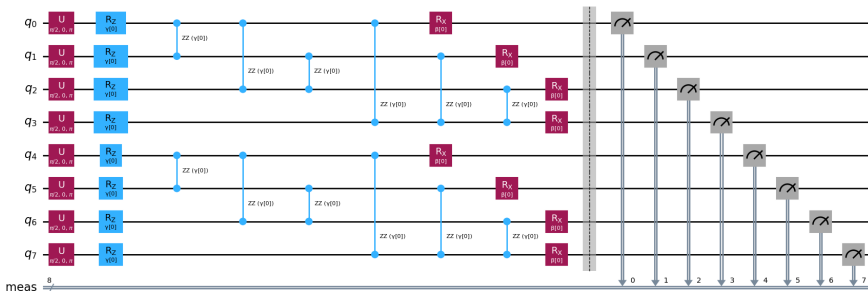


$$f_c(\mathbf{c}) = 2M_0M_1c_0c_1 + 2M_0M_2c_0c_2 + 2M_0M_3c_0c_3 + 2M_1M_2c_1c_2 + 2M_1M_3c_1c_3 + 2M_2M_3c_2c_3 + 2M_0M_1c_4c_5 + 2M_0M_2c_4c_6 + 2M_0M_3c_4c_7 + 2M_1M_2c_5c_6 + 2M_1M_3c_5c_7 + 2M_2M_3c_6c_7 + M_0(M_0 - P_0)c_0 + M_1(M_1 - P_0)c_1 + M_2(M_2 - P_0)c_2 + M_3(M_3 - P_0)c_3 + M_0(M_0 - P_1)c_4 + M_1(M_1 - P_1)c_5 + M_2(M_2 - P_1)c_6 + M_3(M_3 - P_1)c_7 + P_0^2 + P_1^2$$

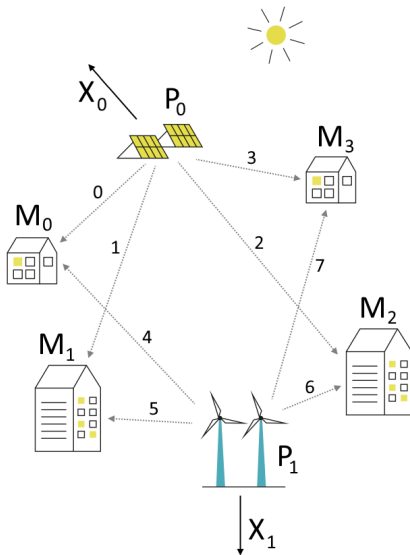
$$c_i \in \{0, 1\} \Rightarrow \sigma_i^z \in \{-1, 1\} \Rightarrow c_i = \frac{1}{2}(1 - \sigma_i^z)$$

$$\begin{aligned} H_c(\boldsymbol{\sigma}^z) = & \frac{1}{2}M_0M_1\sigma_0^z\sigma_1^z + \frac{1}{2}M_0M_2\sigma_0^z\sigma_2^z + \frac{1}{2}M_0M_3\sigma_0^z\sigma_3^z + \frac{1}{2}M_1M_2\sigma_1^z\sigma_2^z + \\ & \frac{1}{2}M_1M_3\sigma_1^z\sigma_3^z + \frac{1}{2}M_2M_3\sigma_2^z\sigma_3^z + \frac{1}{2}M_0M_1\sigma_4^z\sigma_5^z + \frac{1}{2}M_0M_2\sigma_4^z\sigma_6^z + \frac{1}{2}M_0M_3\sigma_4^z\sigma_7^z + \\ & \frac{1}{2}M_1M_2\sigma_5^z\sigma_6^z + \frac{1}{2}M_1M_3\sigma_5^z\sigma_7^z + \frac{1}{2}M_2M_3\sigma_6^z\sigma_7^z - \frac{1}{2}M_0(M_1 + M_2 + M_3 + M_0 - \\ & P_0)\sigma_0^z - \frac{1}{2}M_1(M_1 + M_2 + M_3 + M_0 - P_0)\sigma_1^z - \frac{1}{2}M_2(M_1 + M_2 + M_3 + M_0 - P_0)\sigma_2^z - \\ & \frac{1}{2}M_3(M_1 + M_2 + M_3 + M_0 - P_0)\sigma_3^z - \frac{1}{2}M_0(M_1 + M_2 + M_3 + M_0 - P_1)\sigma_4^z - \\ & \frac{1}{2}M_1(M_1 + M_2 + M_3 + M_0 - P_1)\sigma_5^z - \frac{1}{2}M_2(M_1 + M_2 + M_3 + M_0 - P_1)\sigma_6^z - \\ & \frac{1}{2}M_3(M_1 + M_2 + M_3 + M_0 - P_1)\sigma_7^z + P_0^2 + P_1^2 + M_0M_1 + M_0M_2 + M_0M_3 + \\ & M_1M_2 + M_1M_3 + M_2M_3 + \frac{1}{2}(M_0(M_0 - P_0) + M_1(M_1 - P_0) + M_2(M_2 - P_0) + \\ & M_3(M_3 - P_0) + M_0(M_0 - P_1) + M_1(M_1 - P_1) + M_2(M_2 - P_1) + M_3(M_3 - P_1)) \end{aligned}$$

Parameterized Quantum Circuit (PQC) - ansatz



Konkrétní zadání



Konkrétní zadání



$$P_0 = 10$$

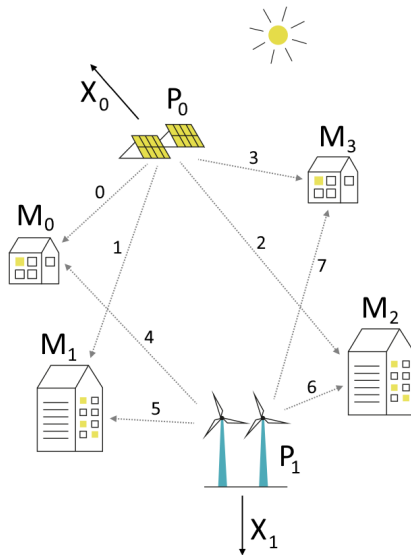
$$P_1 = 20$$

$$M_0 = 1$$

$$M_1 = 5$$

$$M_2 = 6$$

$$M_3 = 3$$



Sestavení konkrétní cenové funkce a Hamiltoniánu

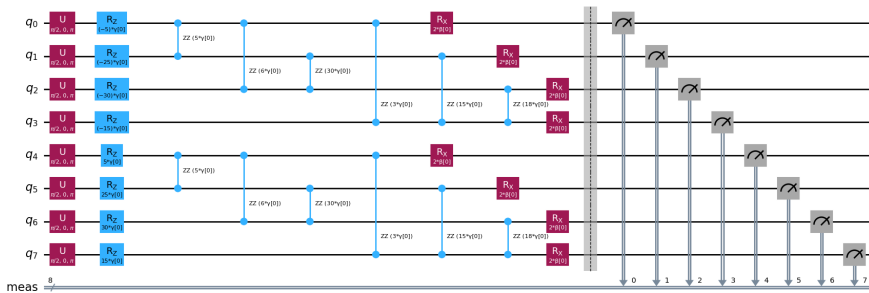


$$f_c(\mathbf{c}) = 10c_0c_1 + 12c_0c_2 + 6c_0c_3 + 60c_1c_2 + 30c_1c_3 + 36c_2c_3 + 10c_4c_5 + 12c_4c_6 + 6c_4c_7 + 60c_5c_6 + 30c_5c_7 + 36c_6c_7 - 9c_0 - 25c_1 - 24c_2 - 21c_3 - 19c_4 - 75c_5 - 84c_6 - 51c_7 + 500$$

$$c_i \in \{0, 1\} \Rightarrow \sigma_i^z \in \{-1, 1\} \Rightarrow c_i = \frac{1}{2}(1 - \sigma_i^z)$$

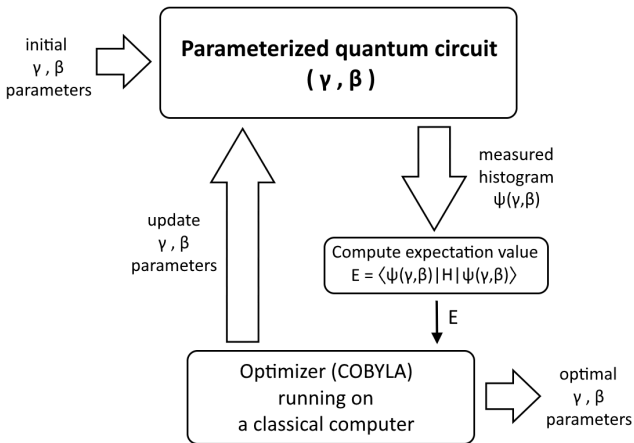
$$\begin{aligned} H_c(\boldsymbol{\sigma}^z) = & 2.5 \sigma_0^z \sigma_1^z + 3 \sigma_0^z \sigma_2^z + 1.5 \sigma_0^z \sigma_3^z + 15 \sigma_1^z \sigma_2^z + 7.5 \sigma_1^z \sigma_3^z + 9 \sigma_2^z \sigma_3^z + \\ & 2.5 \sigma_4^z \sigma_5^z + 3 \sigma_4^z \sigma_6^z + 1.5 \sigma_4^z \sigma_7^z + 15 \sigma_5^z \sigma_6^z + 7.5 \sigma_5^z \sigma_7^z + 9 \sigma_6^z \sigma_7^z - 2.5 \sigma_0^z - 12.5 \sigma_1^z - \\ & 15 \sigma_2^z - 7.5 \sigma_3^z + 2.5 \sigma_4^z + 12.5 \sigma_5^z + 15 \sigma_6^z + 7.5 \sigma_7^z + 423 \end{aligned}$$

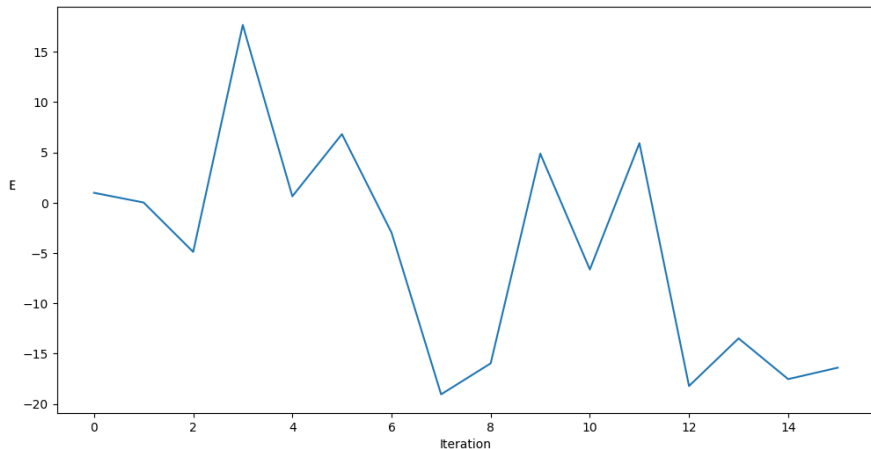
Použitý PQC (ansatz)

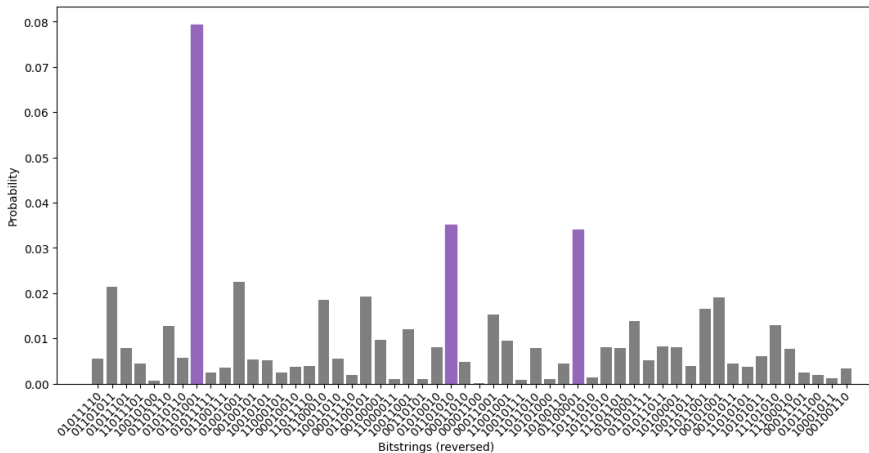


Výsledky kvantové optimalizace

Variational Quantum Circuit (VQC)



Vývoj očekávané hodnoty E při hledání jejího minima

Výsledný histogram $\psi(\gamma_{opt}, \beta_{opt})$ 



$$P_0 = 10$$

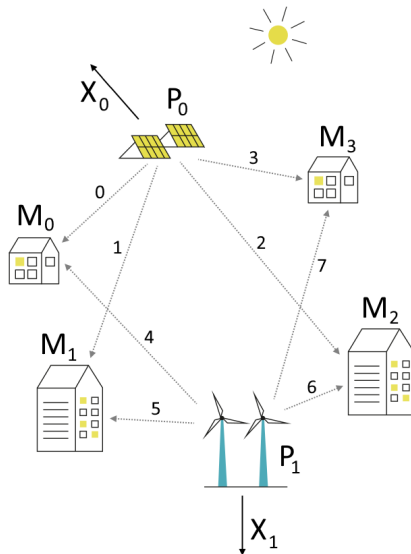
$$P_1 = 20$$

$$M_0 = 1$$

$$M_1 = 5$$

$$M_2 = 6$$

$$M_3 = 3$$





$$P_0 = 10$$

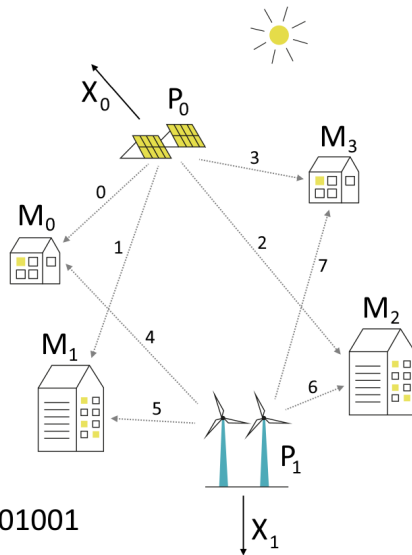
$$P_1 = 20$$

$$M_0 = 1$$

$$M_1 = 5$$

$$M_2 = 6$$

$$M_3 = 3$$



$$c_{\text{OPT}} = 01101001$$



$$P_0 = 10$$

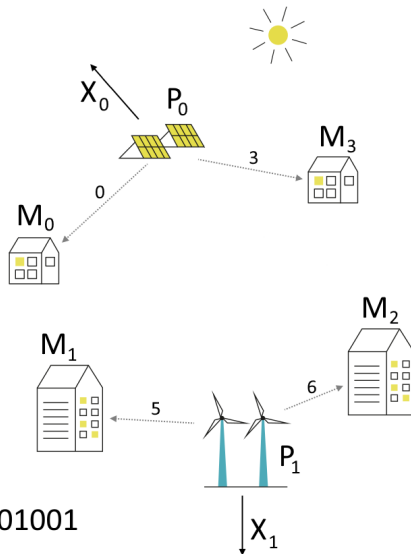
$$P_1 = 20$$

$$M_0 = 1$$

$$M_1 = 5$$

$$M_2 = 6$$

$$M_3 = 3$$



$$c_{\text{OPT}} = 01101001$$



$$P_0 = 10$$

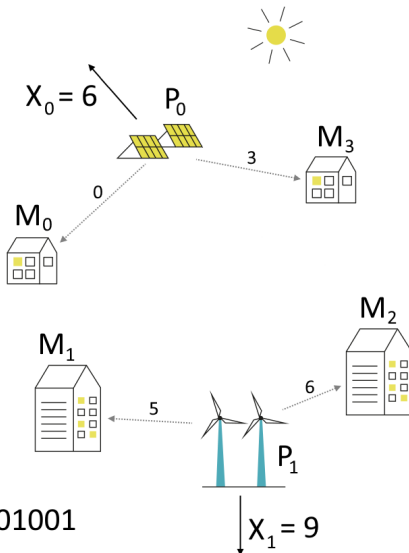
$$P_1 = 20$$

$$M_0 = 1$$

$$M_1 = 5$$

$$M_2 = 6$$

$$M_3 = 3$$



$$c_{\text{OPT}} = 01101001$$



- Nalezená kombinace propojení je z hlediska přetoku zdrojů do distribuční sítě opravdu neoptimálnější. Brutálním procházením všech možných kombinací nebyla u tohoto konkrétního příkladu nalezena optimálnější varianta.
- Samozřejmě je možno cenovou funkci sestavit i jinak, nicméně použitý tvar (součet kvadrátů jednotlivých přetoků) zaručuje rovnoměrné zatížení lokálních zdrojů.
- Při současné ceně kvantového počítače je sice ekonomický nesmysl na něm pomocí QAOA řešit tak malé úlohy, ale jeho výhodou je, že při zvětšování úlohy neroste čas kvantové části tak rychle jako čas řešení pomocí pouze klasického počítače.
- Stejně jako nejlepší klasické algoritmy, roste exponenciálně, ale s menším sklonem¹. Ukázaná kvantová optimalizace pomocí QAOA má smysl až pro řešení problémů s počtem proměnných $N \gtrsim 40$.

¹Science Advances 10(2024) DOI:10.1126/sciadv.adm6761



- Nalezená kombinace propojení je z hlediska přetoku zdrojů do distribuční sítě opravdu neoptimálnější. Brutálním procházením všech možných kombinací nebyla u tohoto konkrétního příkladu nalezena optimálnější varianta.
- Samozřejmě je možno cenovou funkci sestavit i jinak, nicméně použitý tvar (součet kvadrátů jednotlivých přetoků) zaručuje rovnoměrné zatížení lokálních zdrojů.
- Při současné ceně kvantového počítače je sice ekonomický nesmysl na něm pomocí QAOA řešit tak malé úlohy, ale jeho výhodou je, že při zvětšování úlohy neroste čas kvantové části tak rychle jako čas řešení pomocí pouze klasického počítače.
- Stejně jako nejlepší klasické algoritmy, roste exponenciálně, ale s menším sklonem¹. Ukázaná kvantová optimalizace pomocí QAOA má smysl až pro řešení problémů s počtem proměnných $N \gtrsim 40$.

¹Science Advances 10(2024) DOI:10.1126/sciadv.adm6761



- Nalezená kombinace propojení je z hlediska přetoku zdrojů do distribuční sítě opravdu neoptimálnější. Brutálním procházením všech možných kombinací nebyla u tohoto konkrétního příkladu nalezena optimálnější varianta.
- Samozřejmě je možno cenovou funkci sestavit i jinak, nicméně použitý tvar (součet kvadrátů jednotlivých přetoků) zaručuje rovnoměrné zatížení lokálních zdrojů.
- Při současné ceně kvantového počítače je sice ekonomický nesmysl na něm pomocí QAOA řešit tak malé úlohy, ale jeho výhodou je, že při zvětšování úlohy neroste čas kvantové části tak rychle jako čas řešení pomocí pouze klasického počítače.
- Stejně jako nejlepší klasické algoritmy, roste exponenciálně, ale s menším sklonem¹. Ukázaná kvantová optimalizace pomocí QAOA má smysl až pro řešení problémů s počtem proměnných $N \gtrsim 40$.

¹Science Advances 10(2024) DOI:10.1126/sciadv.adm6761



- Nalezená kombinace propojení je z hlediska přetoku zdrojů do distribuční sítě opravdu neoptimálnější. Brutálním procházením všech možných kombinací nebyla u tohoto konkrétního příkladu nalezena optimálnější varianta.
- Samozřejmě je možno cenovou funkci sestavit i jinak, nicméně použitý tvar (součet kvadrátů jednotlivých přetoků) zaručuje rovnoměrné zatížení lokálních zdrojů.
- Při současné ceně kvantového počítače je sice ekonomický nesmysl na něm pomocí QAOA řešit tak malé úlohy, ale jeho výhodou je, že při zvětšování úlohy neroste čas kvantové části tak rychle jako čas řešení pomocí pouze klasického počítače.
- Stejně jako nejlepší klasické algoritmy, roste exponenciálně, ale s menším sklonem¹. Ukázaná kvantová optimalizace pomocí QAOA má smysl až pro řešení problémů s počtem proměnných $N \gtrsim 40$.

¹Science Advances 10(2024) DOI:10.1126/sciadv.adm6761

Thank you for your attention

Jiří Tomčala

VSB – Technical University of Ostrava

jiri.tomcala@vsb.cz

12. listopadu, 2025



IT4INNOVATIONS
NATIONAL SUPERCOMPUTING
CENTER



Aplikace umělé inteligence
a kvantového počítání v energetice

12. listopadu 2025
IT4Innovations



**Zvýšení odolnosti energetických sítí v kontextu dekarbonizace,
decentralizace a udržitelného socioekonomického rozvoje**

CZ.02.01.01/00/23_021/0008759

Operační program Jan Amos Komenský



**Spolufinancováno
Evropskou unií**

