

Click to edit the notes format

# **АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ: ДИНАМИКА И УСТОЙЧИВОСТЬ**

---

**Петр Воробьев**  
**petrvorob@gmail.com**

MIT/Skoltech

В рамках сотрудничества между МТИ и Центром Энергетических Систем  
Сколтеха

В соавторстве с: Po-Hsu Huang, Mohamed Al-Hosani, Jim Kirtley, Kostya Turitsyn

# План

---

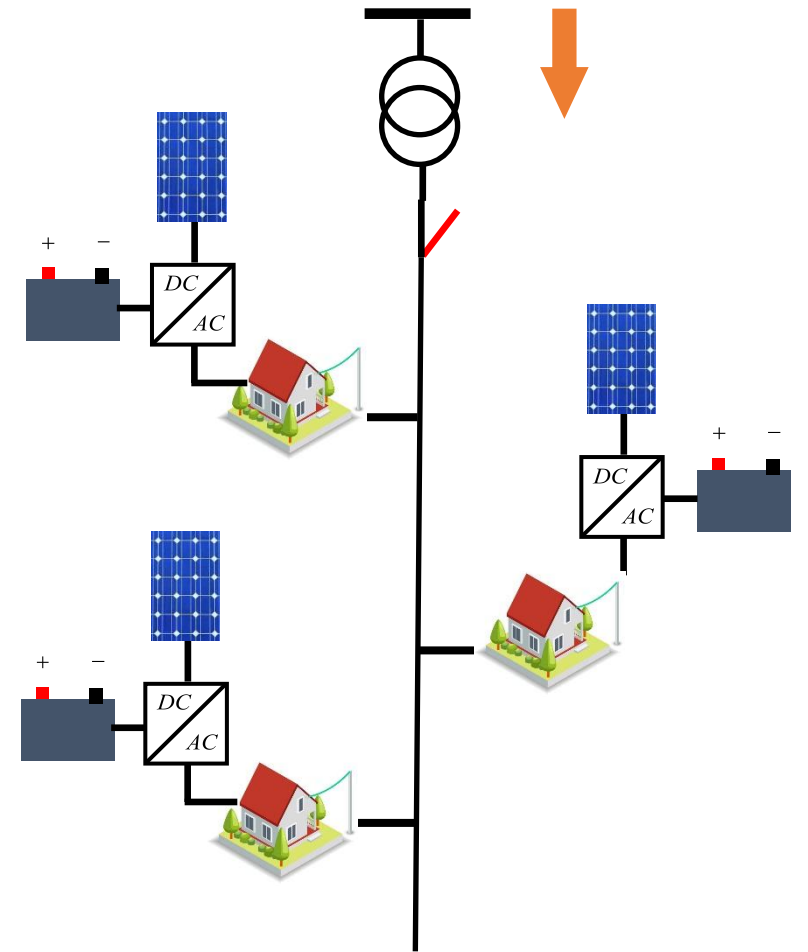
Click to edit the notes format

- Развитие распределительных сетей и необходимость в новых методах регулирования
- Регулирование автономных инверторов
- Устойчивость систем автономных инверторов
- В чем принципиальная особенность инверторов?
- Децентрализованные условия устойчивости инверторных систем
- Возможность реализации стандарта plug-and-play

# Распределительные сети будущего

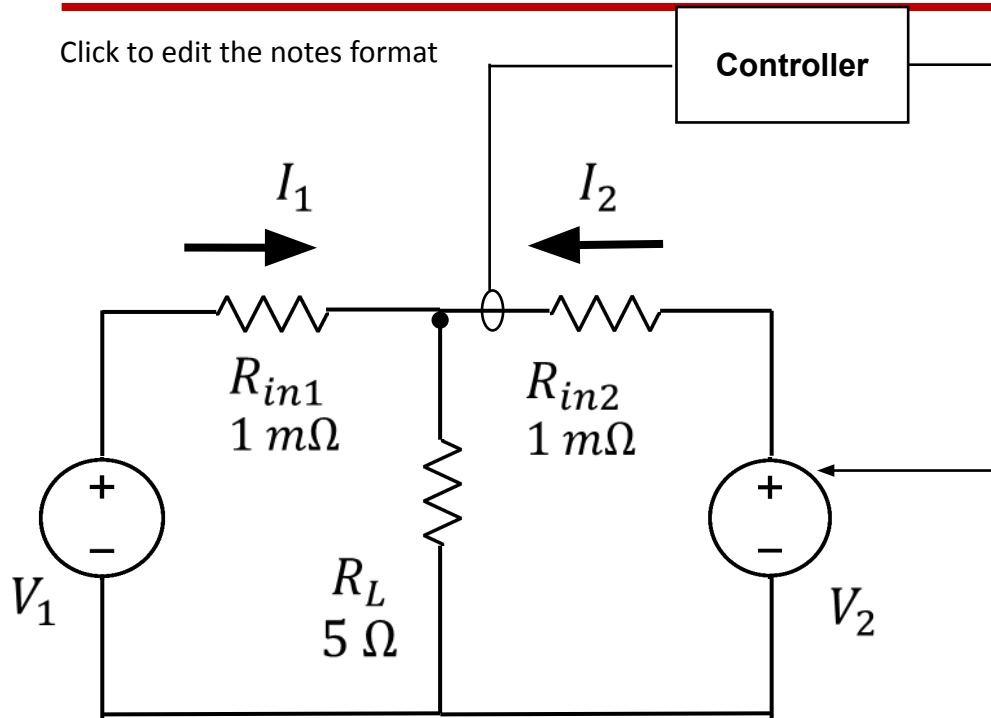
Click to edit the notes format

- Типичная распределительная сеть
- Потребители подключены к подстанции
- Установка устройств распределенной генерации
- Установка накопителей
- Возможна ли автономная работа?



# Простой пример необходимости регулирования

Click to edit the notes format



$$V_1 = 5\text{ V}$$

$$I_1 = 0.5\text{ A}$$

$$V_2 = 5\text{ V}$$

$$I_2 = 0.5\text{ A}$$

$$V_1 = 5\text{ V}$$

$$I_1 = -24.5\text{ A}$$

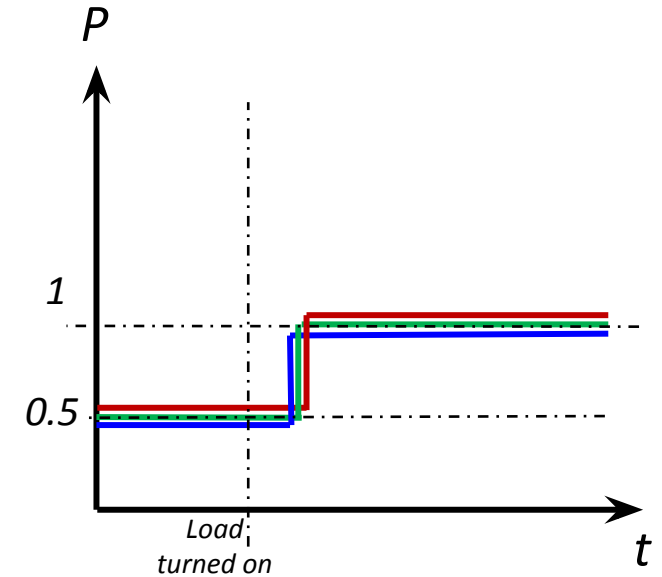
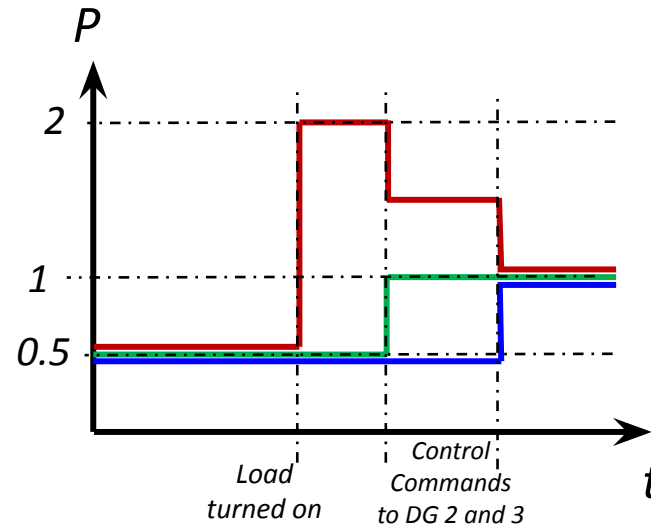
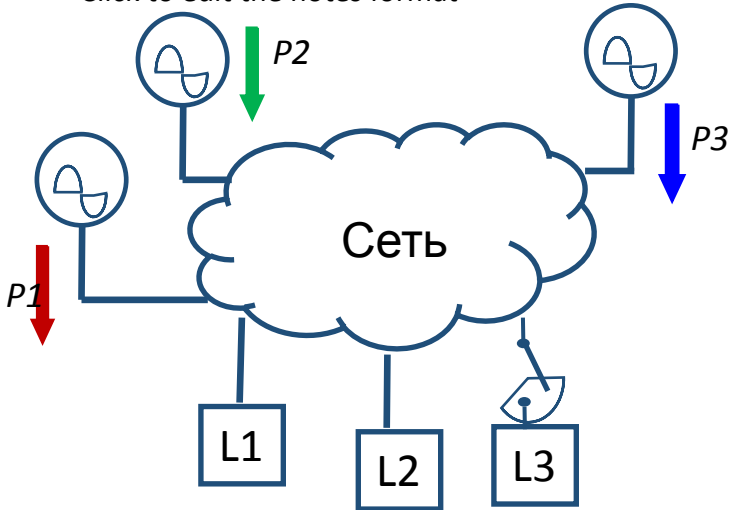
$$V_2 = 5.05\text{ V}$$

$$I_2 = 25.5\text{ A}$$

- Аккумулятор питает нагрузку
- Подключаем второй аккумулятор
- Как избежать излишних перетоков?

# Регулирование генерации

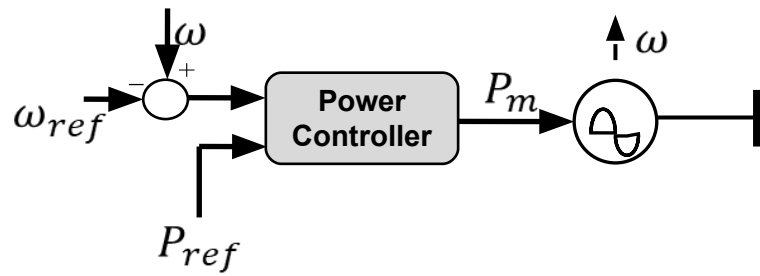
Click to edit the notes format



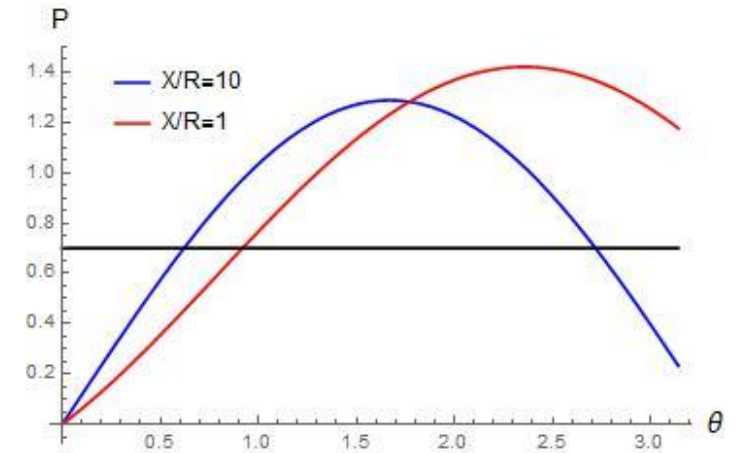
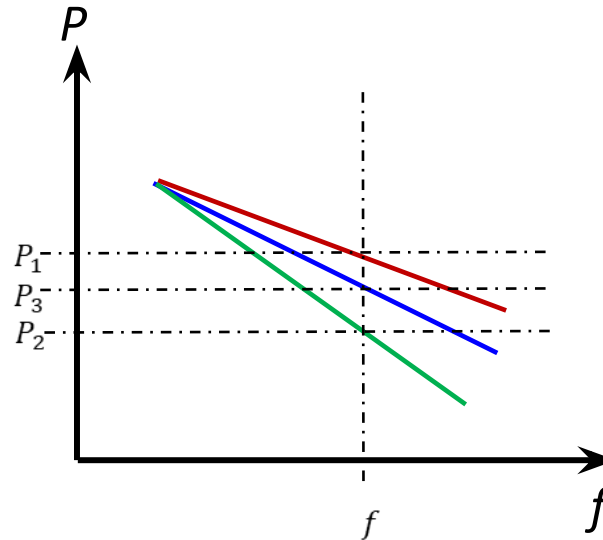
- Один ведущий генератор, перераспределение нагрузки выполняется «вручную»
- Становится непрактичным с ростом размера сети
- Необходимы методы автоматического

# Регулирование генерации в электрических сетях

Click to edit the notes format



$$P_m = P_{ref} - \frac{1}{k_p} \frac{(\omega - \omega_0)}{\omega_0}$$

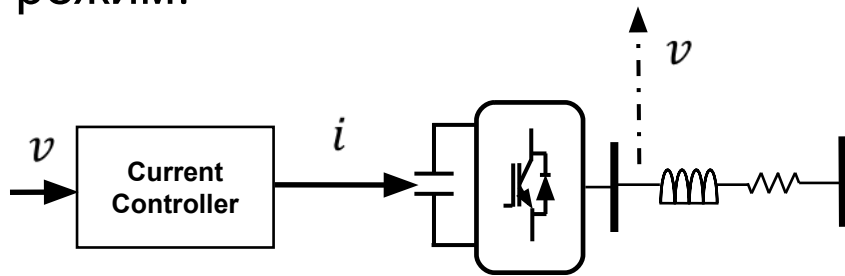


- Частота вращения генератора является индикатором баланса мощности
- Измеряем частоту – регулируем механическую мощность
- Полностью децентрализованная система управления генерацией

# Режимы работы инвертора

Click to edit the notes format

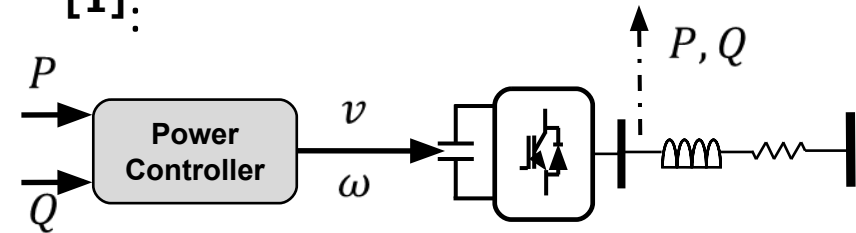
Ведомый режим:



$$i = P_{ref}/v$$

- Выходной ток регулируется в зависимости от терминального напряжения
- Применяется, например, для подключения солнечных батарей
- Для работы необходима внешняя сеть

Автономный режим [1]:



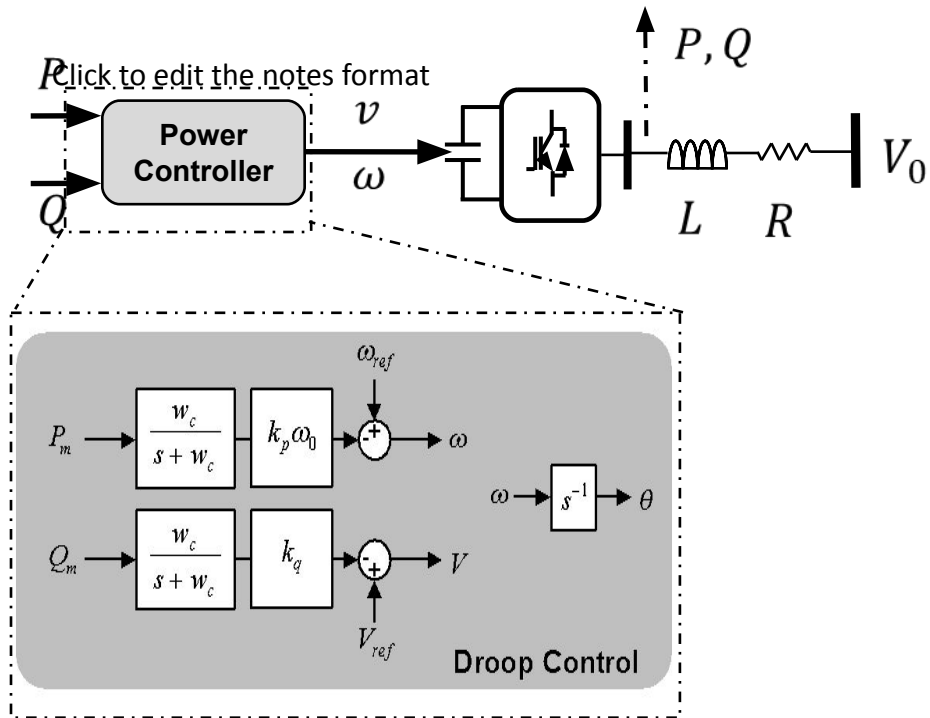
$$\omega = \omega_{ref} - k_p \omega_0 P$$

$$V = V_{ref} - k_q Q$$

- На терминале регулируется частота и величина напряжения
- Частота регулируется в ответ на потребляемую мощность
- Для надежной работы сети необходимы **несколько автономных инверторов**

[1]. Pogaku, N., Prodanovic, M., & Green, T. C. (2007). Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid. *IEEE Transactions on power electronics*, 22(2), 613-625.

# Регулирование инвертора: динамическая модель



- Фильтр нижних частот (5-6 Hz) для мощности
- Динамическая модель подобна модели синхронной машины

- Динамика частоты и напряжения:

$$\tau \lambda_p \dot{\omega}(t) = \lambda_p \omega_{ref} - P(t) - \lambda_p \omega(t)$$

$$\tau \lambda_q \dot{V}(t) = \lambda_q V_{ref} - Q(t) - \lambda_q V(t)$$

$$\lambda_p = \frac{1}{k_p \omega_0}; \quad \lambda_q = \frac{1}{k_q}$$

- Динамика синхронной

машины:

$$\frac{2H}{\omega_0} \dot{\omega}(t) = P_m - P_e - \frac{1}{k_p} \frac{(\omega - \omega_0)}{\omega_0}$$

**Какие значения коэффициентов статизма допустимы?**



# Возможные сценарии возникновения неустойчивости

Click to edit the notes format

1



- **Расширение сети**
- Добавление инвертора в сеть

2



- **«Усиление» сети**
- Добавление линий в сеть

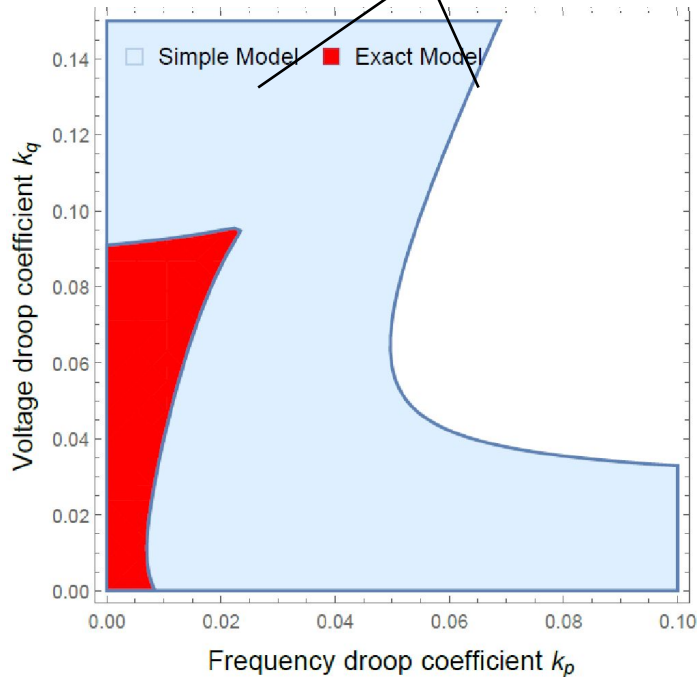
3



- **Замена инвертора на другой, с меньшей мощностью**

# Автономные инверторы: оценка статической устойчивости

Click to edit the notes format



~~$$L \frac{dI}{dt} = V e^{j\theta} - V_0 - (R + j\omega_0 L)I$$~~

$$\tau \lambda_p \dot{\omega}(t) = \lambda_p \omega_{ref} - P(t) - \lambda_p \omega(t)$$

$$I(t) = \frac{V e^{j\theta} - V_0}{R + jX}$$

$$P = \text{Re}[V \cdot I^*] = B \cdot \sin \theta + G \cdot (1 - \cos \theta)$$

$$B = \frac{X}{R^2 + X^2}; \quad G = \frac{R}{R^2 + X^2}$$

**Линеаризованная модель:**

$$\tau \lambda_p \cdot \delta \ddot{\theta} + \lambda_p \cdot \delta \dot{\theta} + B \cdot \delta \theta + G \cdot \delta V = 0$$

$$\tau \lambda_q \cdot \delta \dot{V} + (\lambda_q + B) \cdot \delta V - G \cdot \delta \theta = 0$$

Click to edit the notes format

Click to edit the notes format

Click to edit the notes format

Click to edit the notes format

Click to edit the notes format

Click to edit the notes format



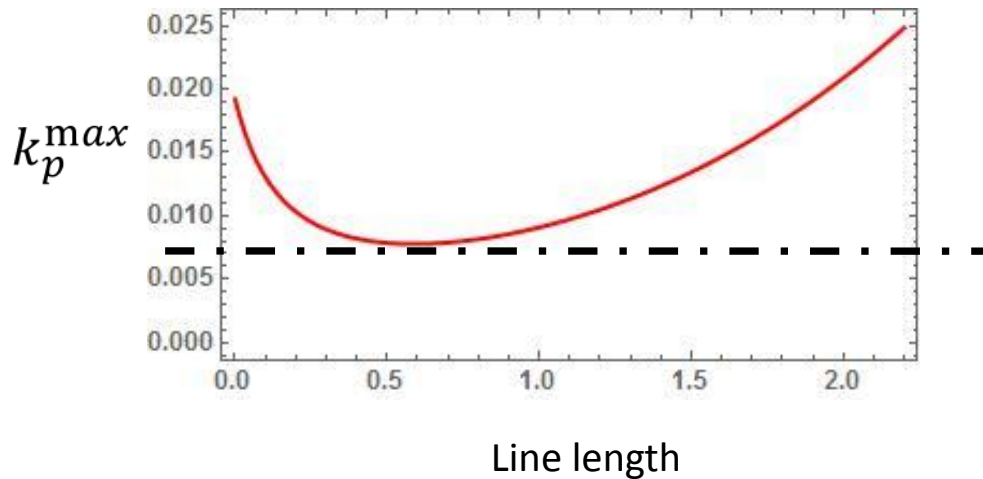
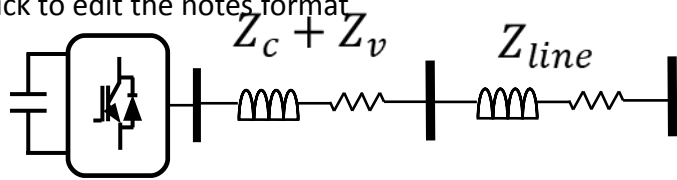
Click to edit the notes format

Click to edit the notes format

Click to edit the notes format

# Plug-and-Play стандарты?

Click to edit the notes format



- Задать стандарт для виртуального и присоединенного импедансов для каждого инвертора
- Переходная проводимость ограничена для **любых значений** соединяющей линии
- Работа ниже максимально допустимых коэффициентов статизма  $k_p^{\max}$  гарантирует устойчивость
- Основа для реализации стандартов plug-and-play

# ССЫЛКИ

Click to edit the notes format

1. P. Vorobev, P. H. Huang, M. Al Hosani, J. L. Kirtley and K. Turitsyn, "High-Fidelity Model Order Reduction for Microgrids Stability Assessment," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 874-887, Jan. 2018.
2. P. Vorobev, P. H. Huang, M. A. Hosani, J. L. Kirtley and K. Turitsyn, "A framework for development of universal rules for microgrids stability and control," *2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC)*, Melbourne, VIC, 2017, pp. 5125-5130.
3. P. H. Huang, P. Vorobev, M. A. Hosani, J. L. Kirtley and K. Turitsyn, "Systematic design of virtual component method for inverter-based microgrids," *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, IL, 2017, pp. 1-5.
4. Huang, P. H., Vorobev, P., Al Hosani, M., Kirtley, J. L., & Turitsyn, K. (2017). "Virtual Impedance for Inverter-Based Microgrids". *Submitted to IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
5. Vorobev, P., Huang, P. H., Al Hosani, M., Kirtley, J. L., & Turitsyn, K. (2018). "Decentralized Stability Certificates for Microgrids". *In preparation*.

# Благодарности

Click to edit the notes format

- MIT/Skoltech initiative
- Skoltech-MIT Next Generation program
- The Ministry of Education and Science of Russian Federation
- Cooperative Agreement between the Masdar Institute of Science and Technology (Masdar Institute), Abu Dhabi, UAE and the Massachusetts Institute of Technology (MIT)

Click to edit the notes format

# Спасибо