

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

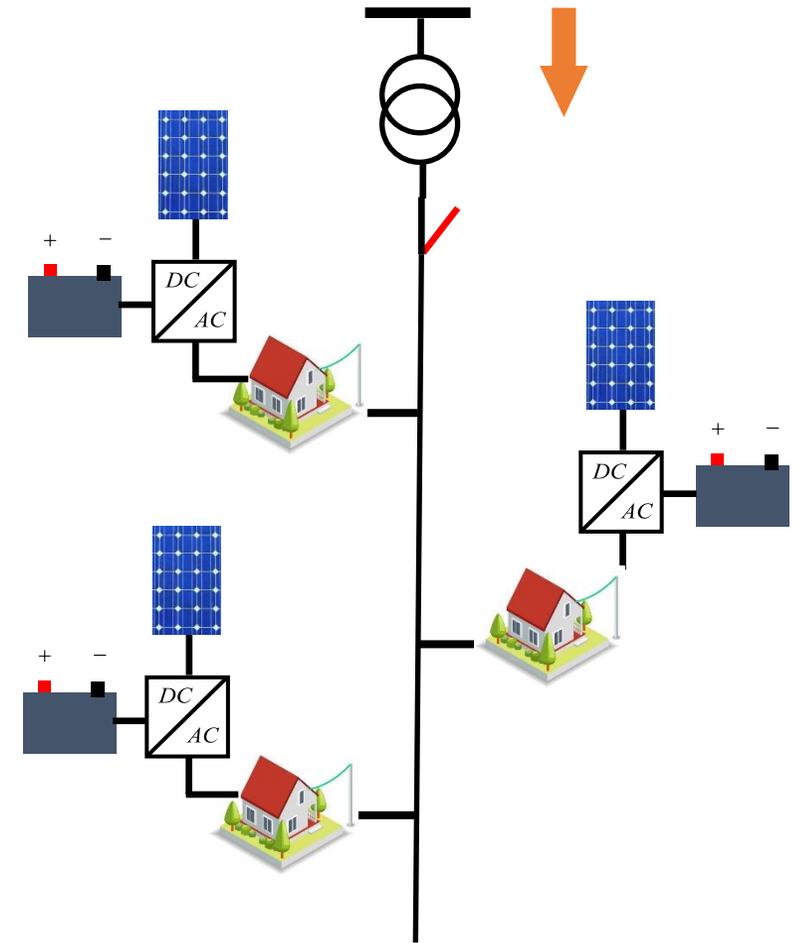
Click to edit the notes format

- 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

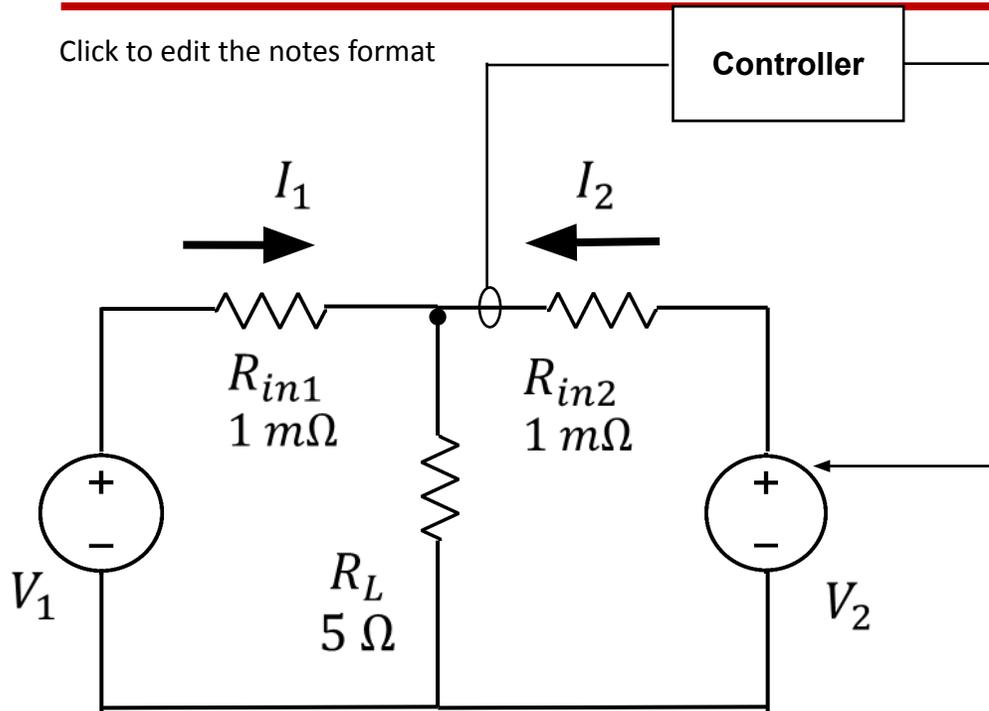
Click to edit the notes format

- 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



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

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

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

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

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

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

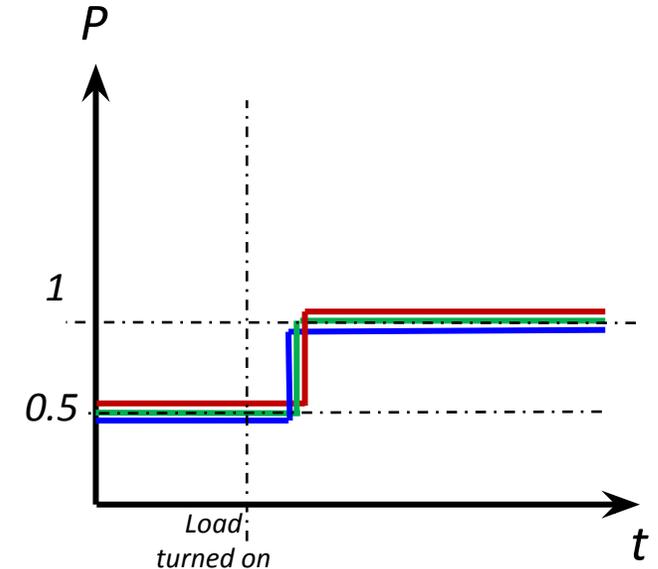
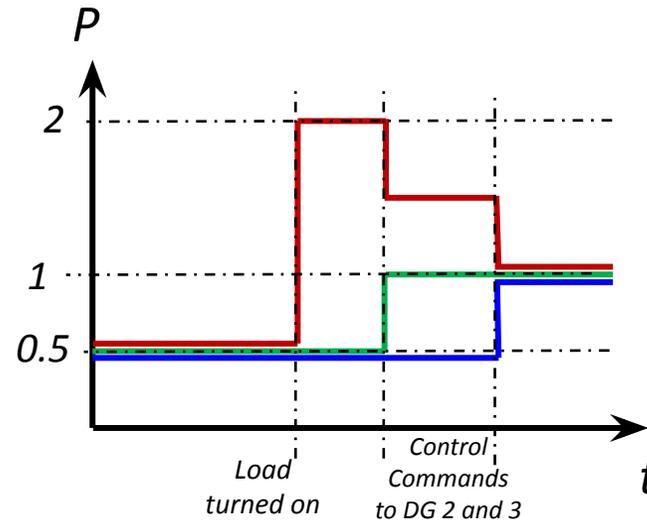
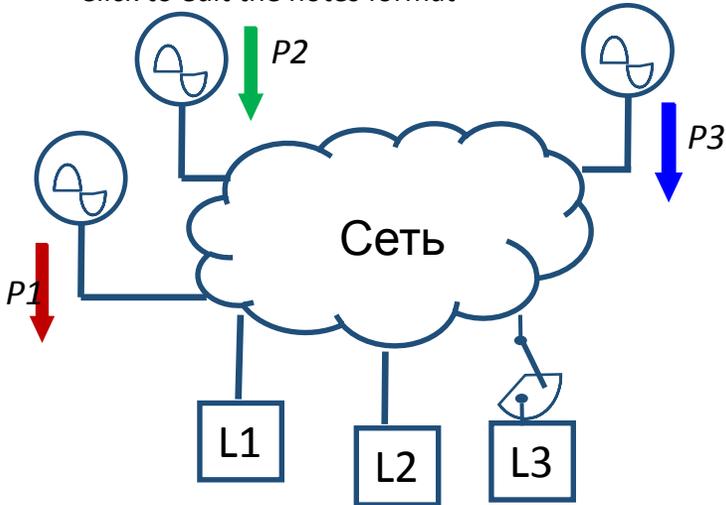
$$V_2 = 5.05\text{ V}$$

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

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

Регулирование генерации

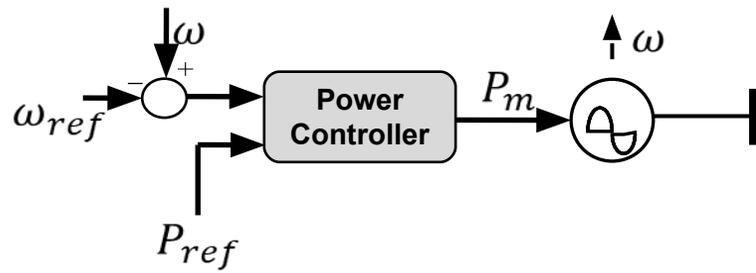
Click to edit the notes format



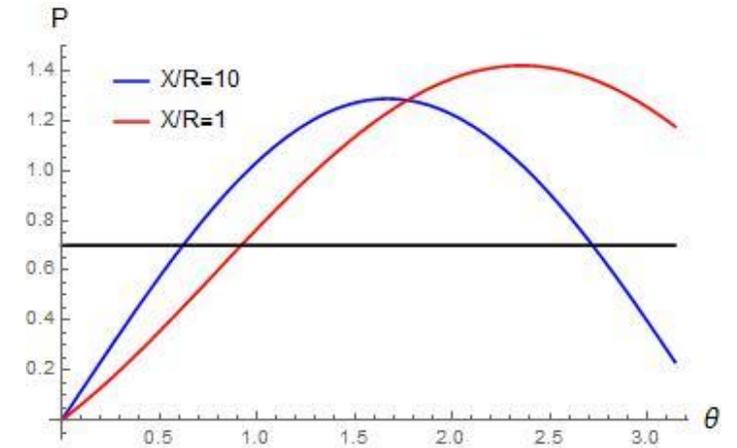
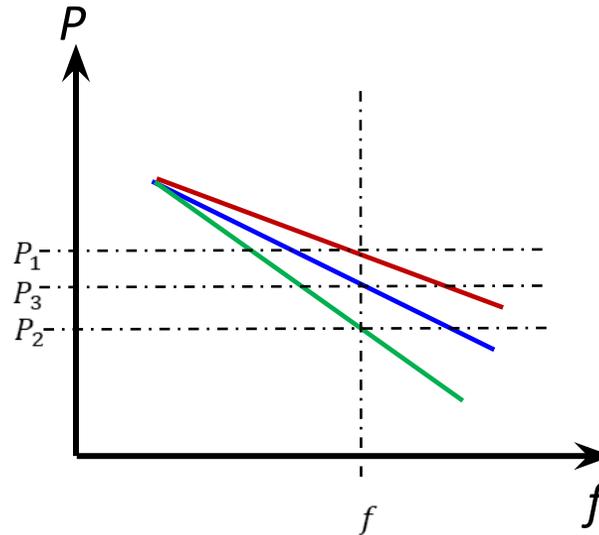
- Один ведущий генератор, перераспределение нагрузки выполняется «вручную»
- Становится непрактичным с ростом размера сети
- Необходимы методы автоматического

Регулирование генерации в электрических сетях

Click to edit the notes format



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

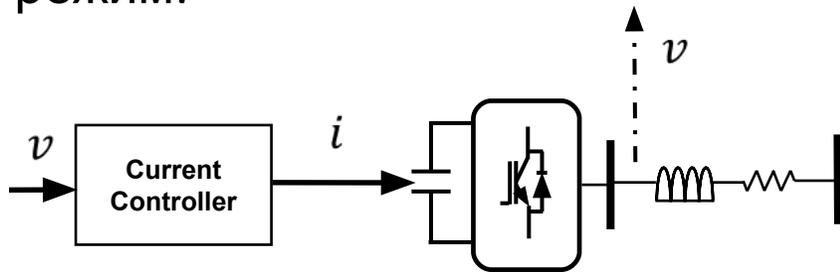


- Частота вращения генератора является индикатором баланса мощности
- Измеряем частоту – регулируем механическую мощность
- Полностью децентрализованная система управления генерацией

Режимы работы инвертора

Click to edit the notes format

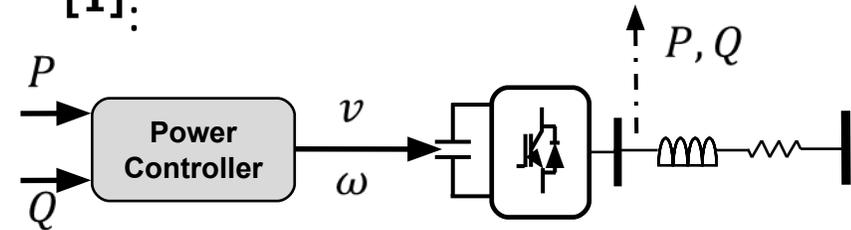
Ведомый режим:



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

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

Автономный режим [1]:



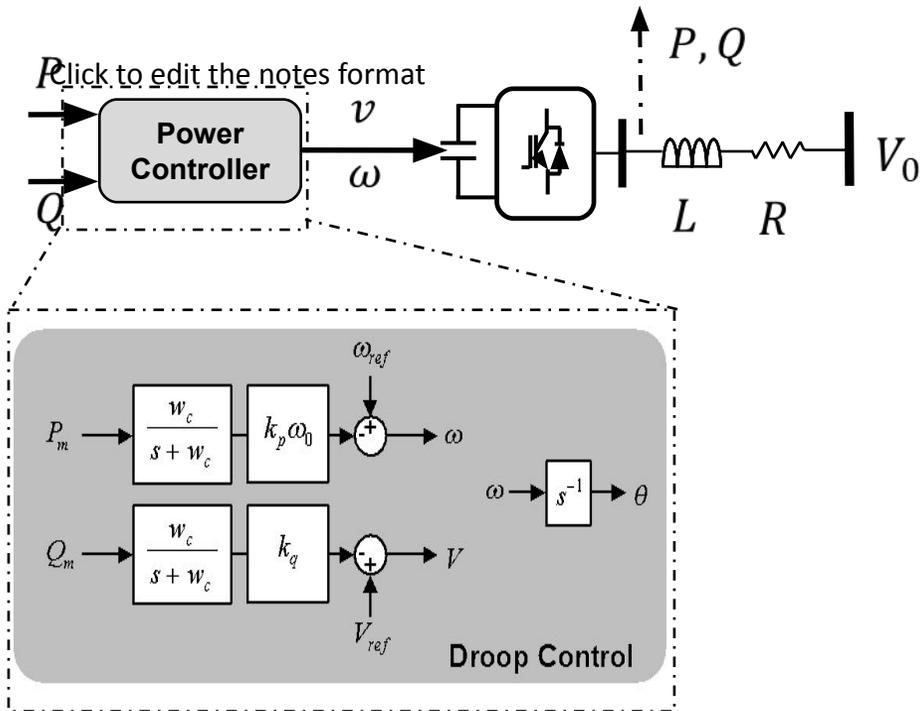
$$\omega = \omega_{ref} - k_p \omega_0 P$$

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

- 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

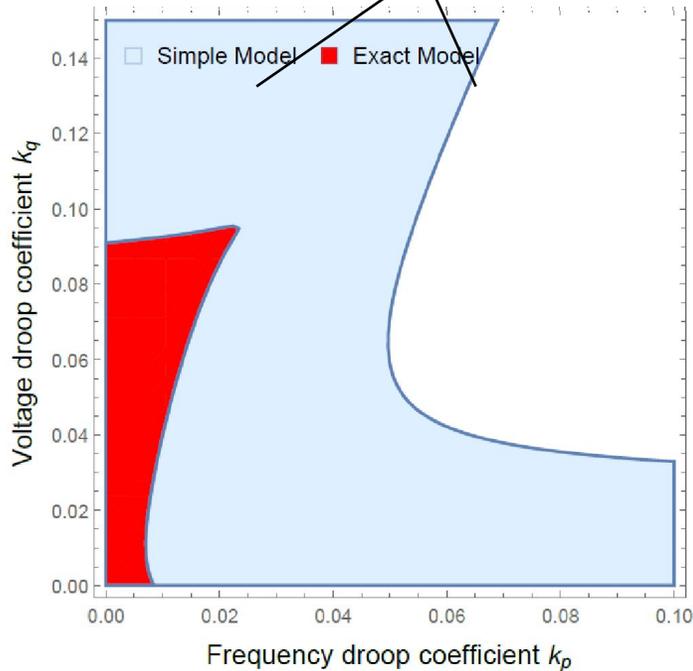
3



- **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:

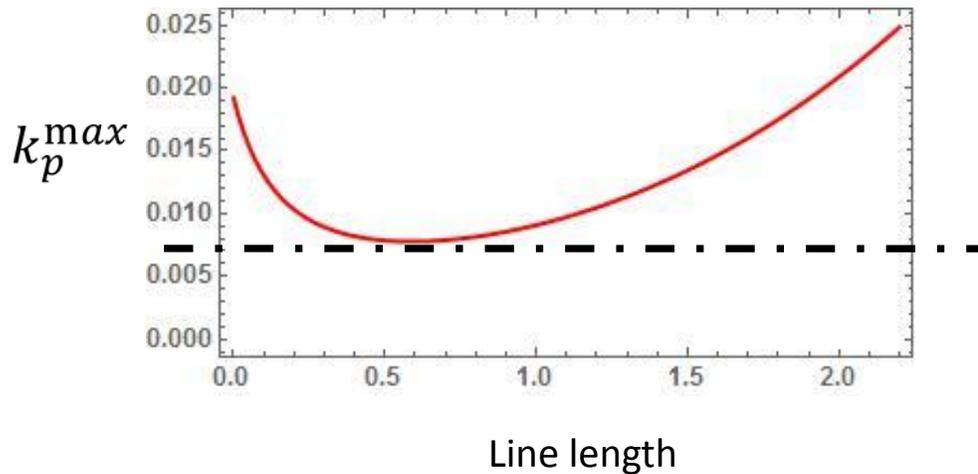
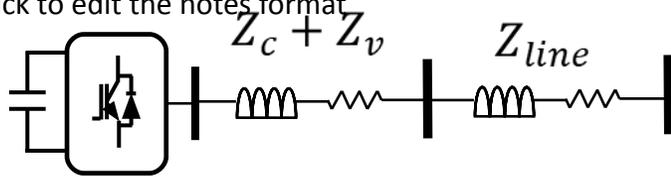
$$\tau \lambda_p \cdot \delta \ddot{\theta} + \lambda_p \cdot \delta \dot{\theta} + B \cdot \delta \theta + G \cdot \delta V = 0$$

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

Click to edit the notes format

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