

Расчет и исследование влияния LCL-фильтра на качество электроэнергии в сети

Автор: Кадеев Д.В.,
инженер-исследователь ООО НПП "ЭКРА",
г. Чебоксары

Введение

Проблема:

Активные выпрямители (AFE) ухудшают качество электроэнергии, гармонические искажения вызывают:

- Перегрев оборудования
- Ложные срабатывания защит
- Дополнительные потери энергии

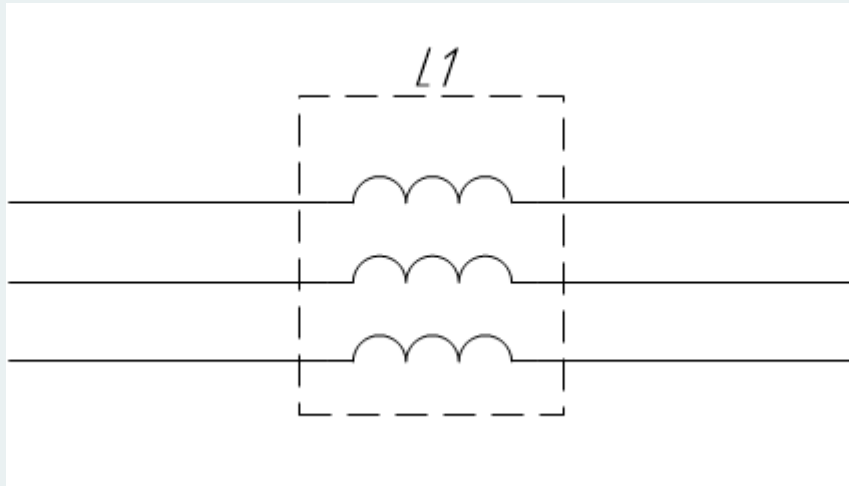
Решение:

Применение LCL-фильтров для снижения гармоник. Соответствие стандартам: IEEE 519, ГОСТ 32144-2013

Сравнение фильтров.

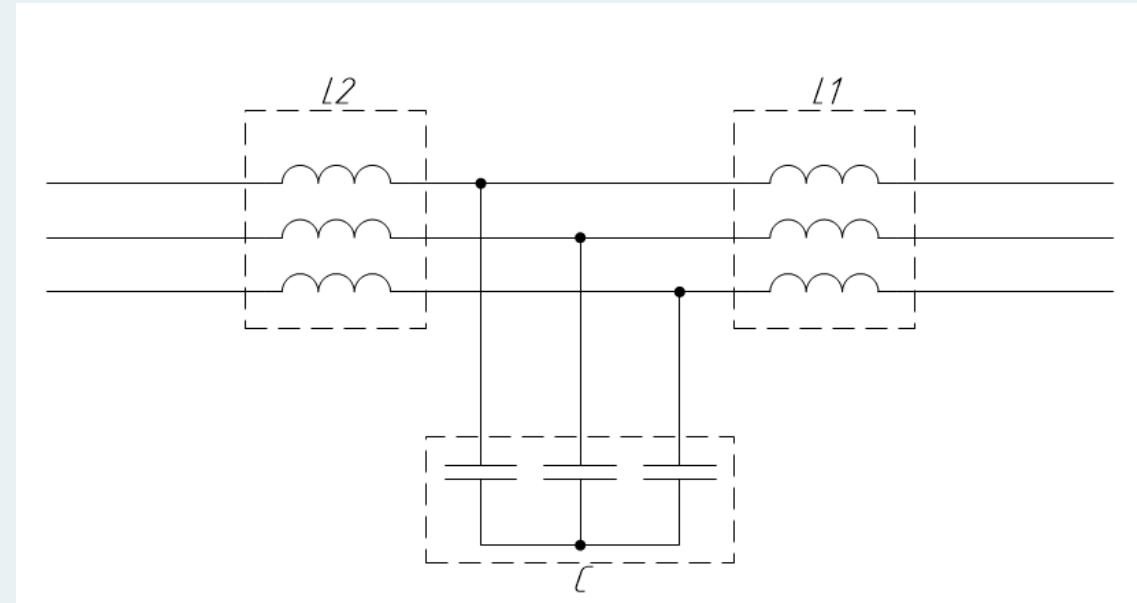
L-фильтр:

- Простая структура (одна индуктивность)
- Большие габариты, если требуется большая индуктивность
- Ограниченная эффективность



LCCL-фильтр:

- L1 - инверторная сторона
- C - конденсатор
- L2 - сетевая сторона
- Меньшие габариты, лучшая фильтрация



Принцип работы LCL-фильтра

Высокочастотные гармоники замыкаются через конденсатор, в сеть поступает «очищенный» ток.

Ключевое условие: $10f_{\text{сети}} < f_{\text{рез}} < 0.5f_{\text{sw}}$. Если резонансная частота будет слишком низкой и близкой к сетевой, фильтр начнет оказывать значительное влияние на основную гармонику, $f_{\text{рез}} < 0.5f_{\text{sw}}$ гарантирует, что область эффективной фильтрации (где АЧХ имеет крутой спад) начинается до главных коммутационных гармоник, и у системы управления есть достаточный запас по фазе для компенсации резонанса.

Преимущества:

- Высокая эффективность при малых индуктивностях
- Снижение стоимости и габаритов

Методика расчета

Основные формулы:

$$Z_{\text{баз}} = (U_{\text{инв}})^2 / P_{\text{ном}}$$

$$C_{\text{баз}} = 1 / Z_{\text{баз}} \times \omega_c$$

$$L1 = U_{\text{dc}} / (16 \times \Delta i_{L1} \times f_{\text{sw}})$$

$$L2 = r \times L1$$

$$C_f = (0.01 \div 0.08) \times C_{\text{баз}}$$

$$f_{\text{рез}} = 1 / (2\pi \times \sqrt{(L1 + L2) \times C_f})$$

Порядок расчета:

1. Базовые параметры
2. Конденсатор
3. Индуктивности
4. Проверка резонансной частоты
5. Демпфирование

Методика расчета

Входные данные:

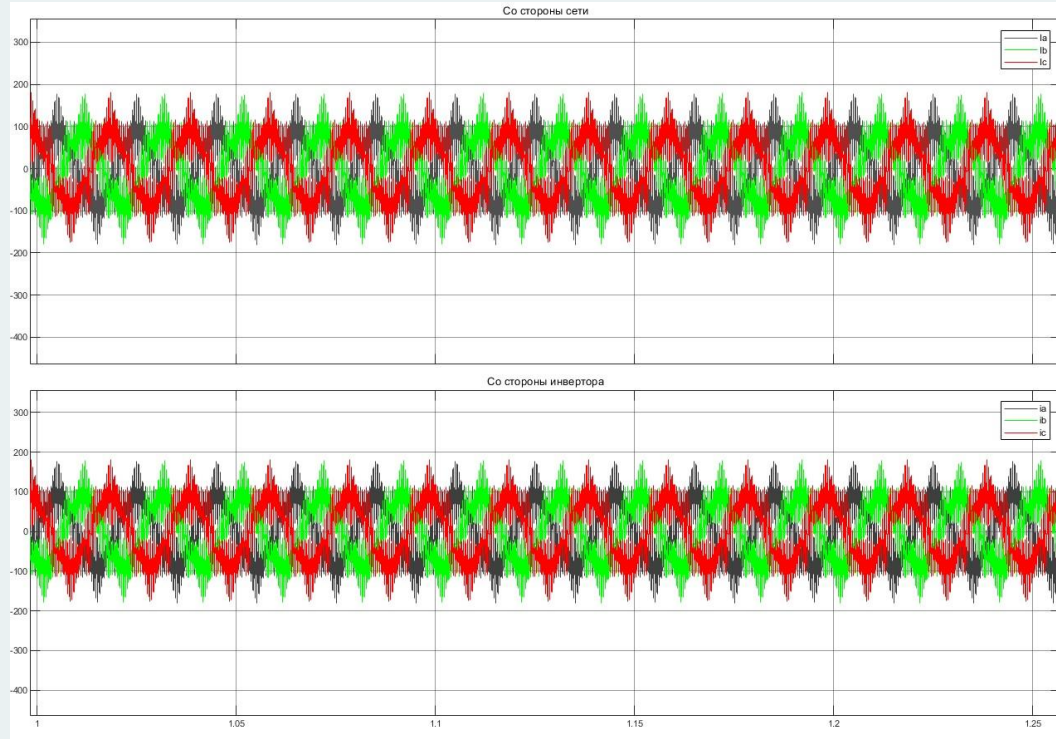
- $P_{ном} = 1200 \text{ кВт}$
- $f_{sw} = 2000 \text{ Гц}$
- $U_{сети} = 690 \text{ В}$
- $\Delta i_{L1} = 11\%$

Результаты:

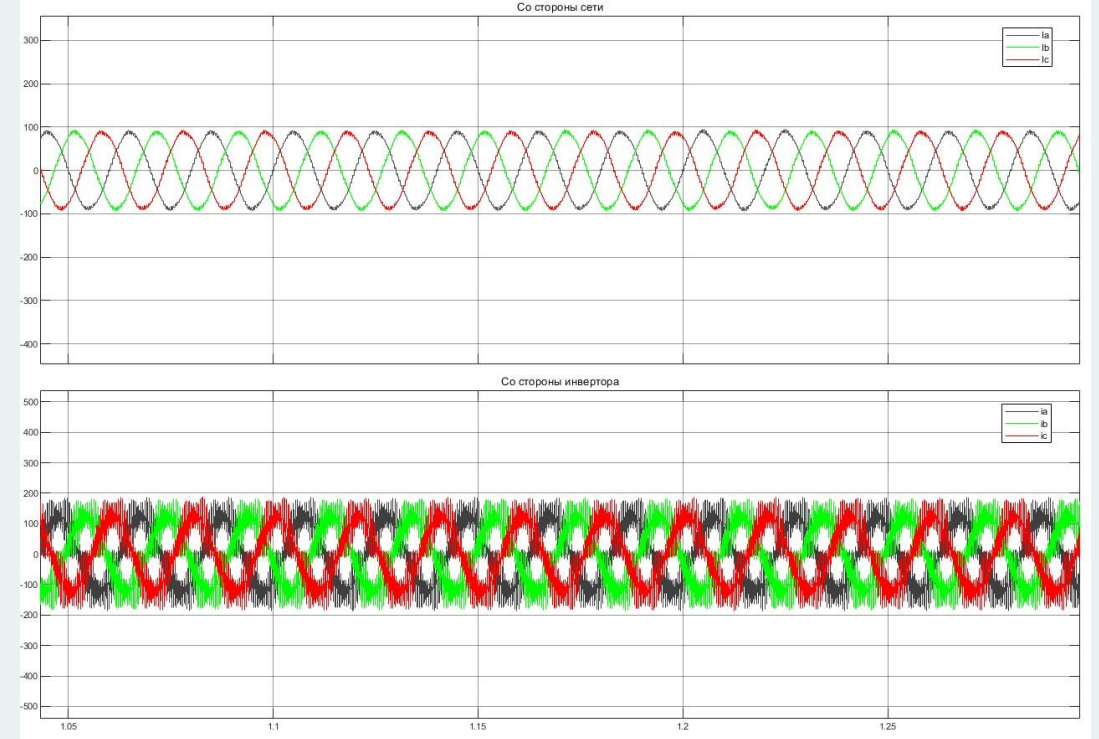
- $L1 = 381 \text{ мкГн}$
- $L2 = 191 \text{ мкГн}$
- $C = 602 \text{ мкФ}$
- $f_{рез} = 575 \text{ Гц}$

Проверка: $500 \text{ Гц} < 575 \text{ Гц} < 1000 \text{ Гц}$

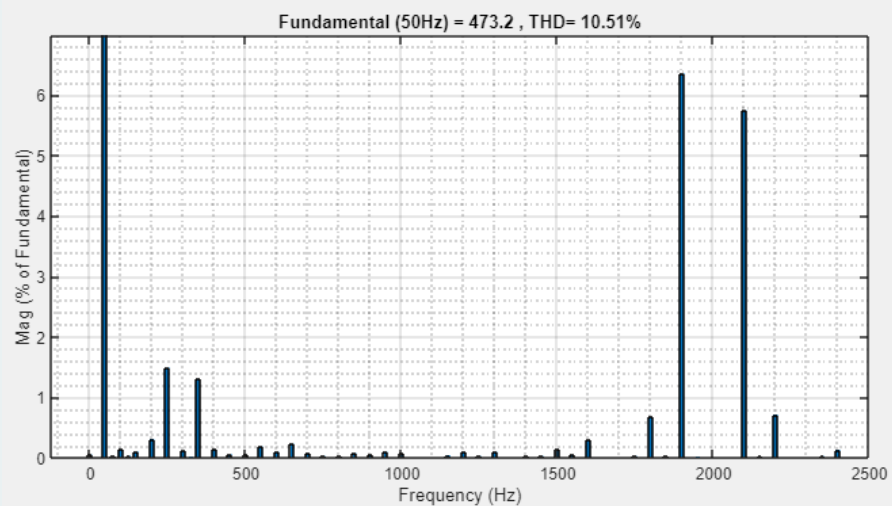
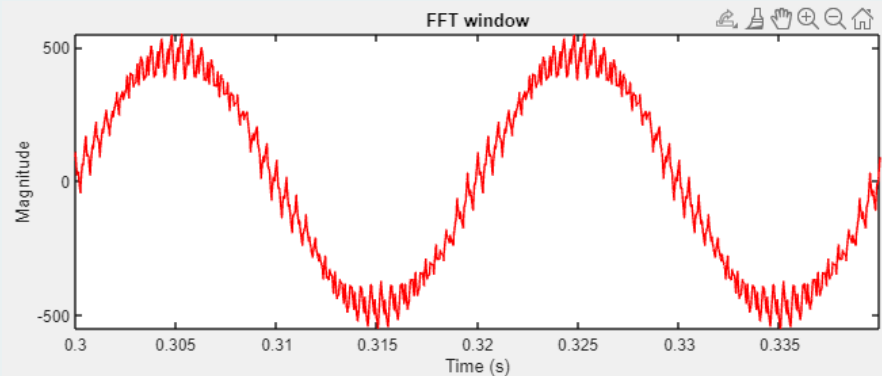
Результаты моделирования



L-фильтр

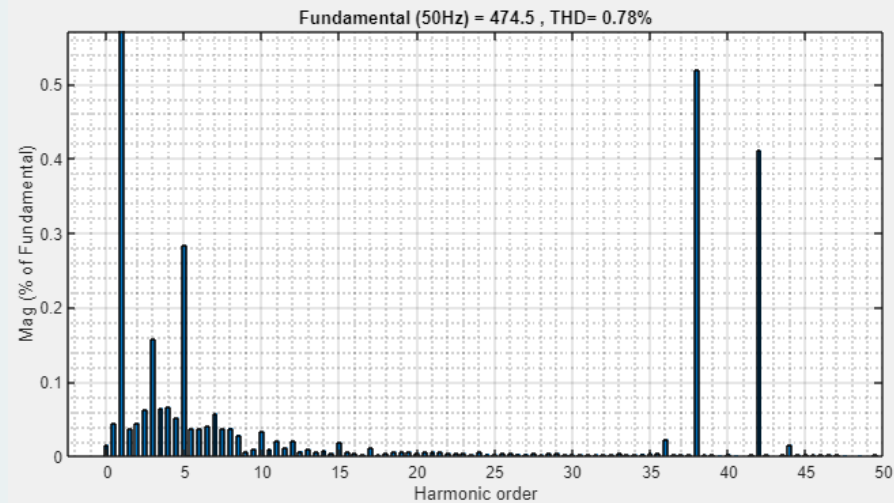
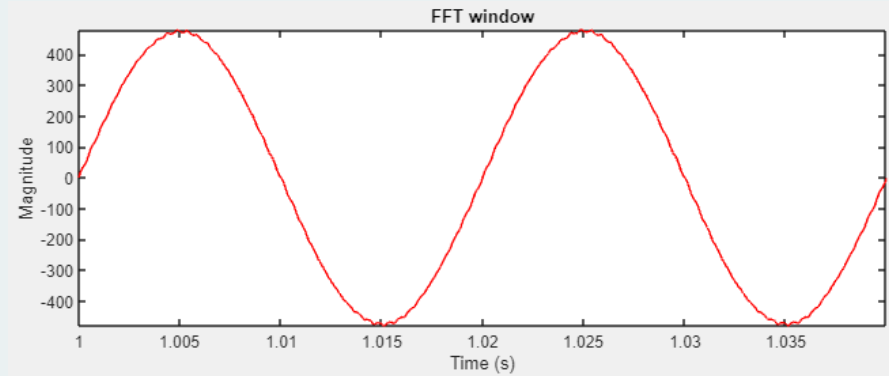


LCL-фильтр



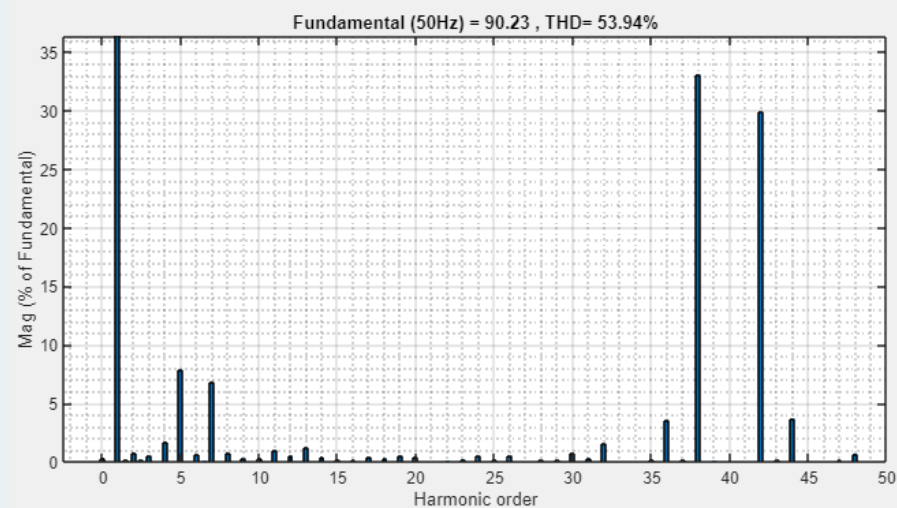
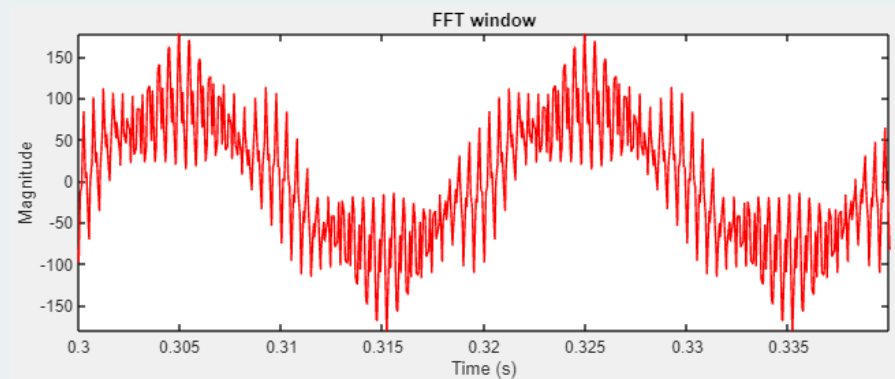
L-фильтр:

- THD напряжения сети= 10,51%

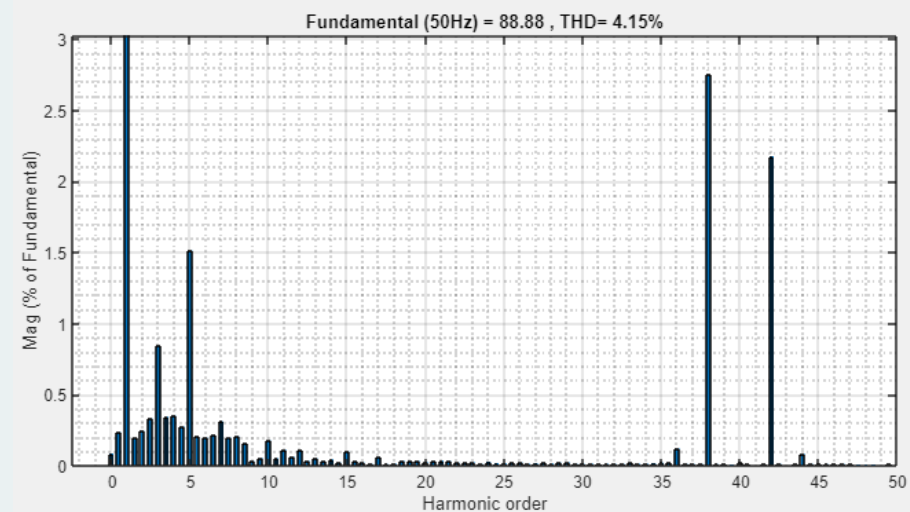
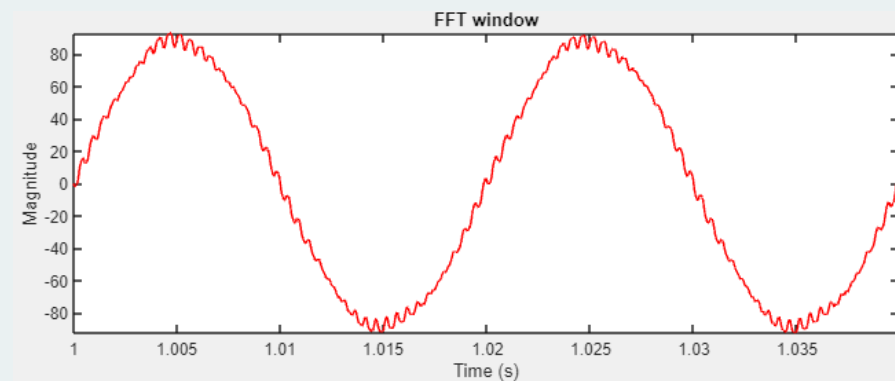


LCL-фильтр:

- THD напряжения сети= 0,78%

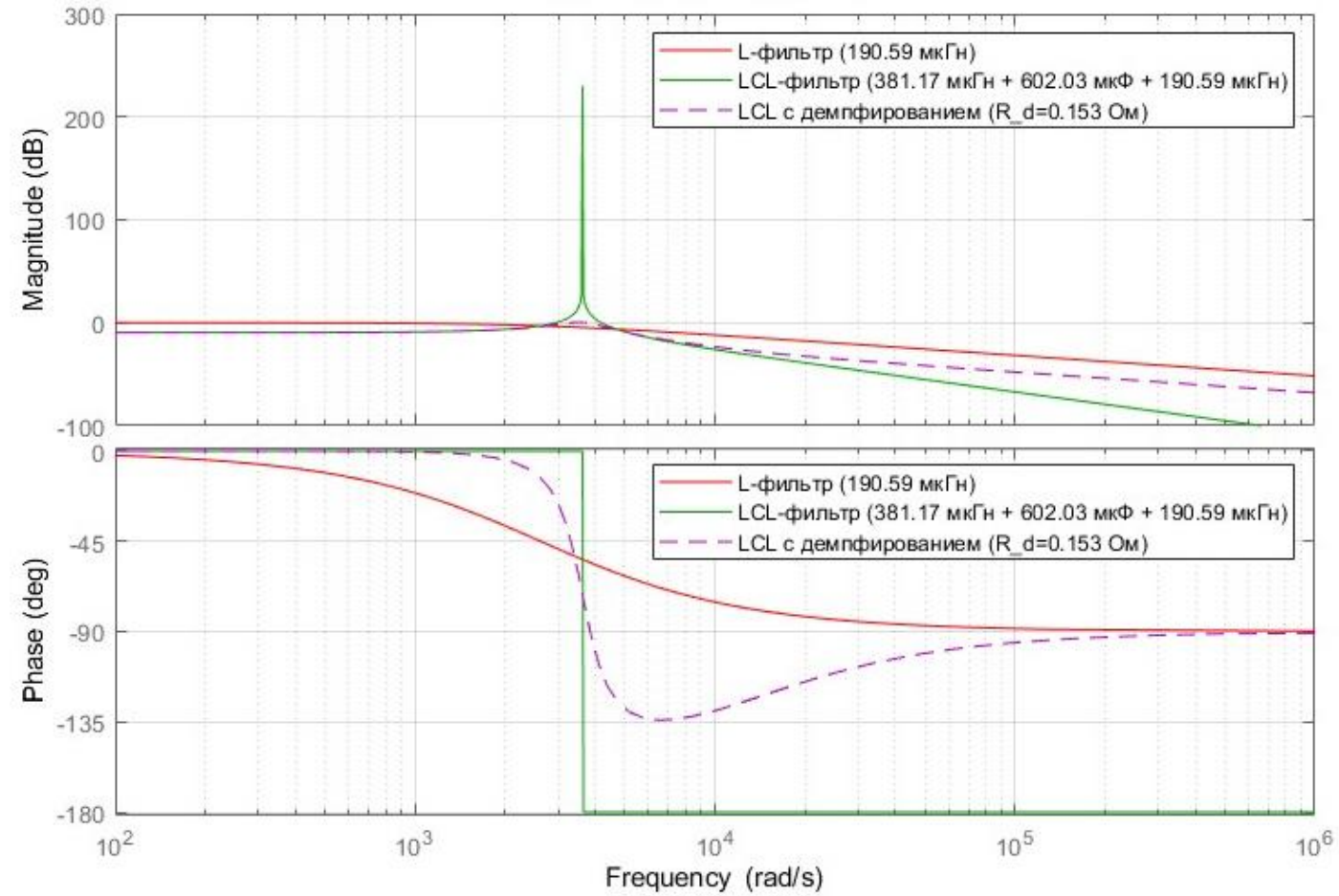


L-фильтр:
- THD тока= 53,94%



LCL-фильтр:
- THD тока= 4,15%

Сравнение АЧХ фильтров



Спасибо за внимание!