

# Расчет параметров DC-шины

## Содержание

- 1 Общие указания
- 2 Выбор типа конденсаторов  
(Электролитические/Полипропиленовые)
- 3 Нормирование параметров DC-шины инвертора и выпрямителя
- 4 Рекомендации по применению

**Arendt Wintrich, Андрей Колпаков,**

**SEMIKRON**

- **Основное правило**

- 0,06..08мФ на 1A of  $I_{out}$  (с учетом параллельного соединения C)
- например: 1000A = 60...80мФ
  - 70мФ  $\approx$  21 x 3.3мФ = 7 // конденсаторов на фазу, или
  - 70мФ  $\approx$  15 x 4.7мФ = 5 // конденсаторов на фазу
  - Правило для параллельного соединения. Последовательное соединение снижает  $C_{tot}$  в n раз (например, n=2  $\square$  35мФ для  $V_{CC}=800...900V$ ; n=3  $\square$  23мФ для  $V_{CC}=1200...1350V$ )

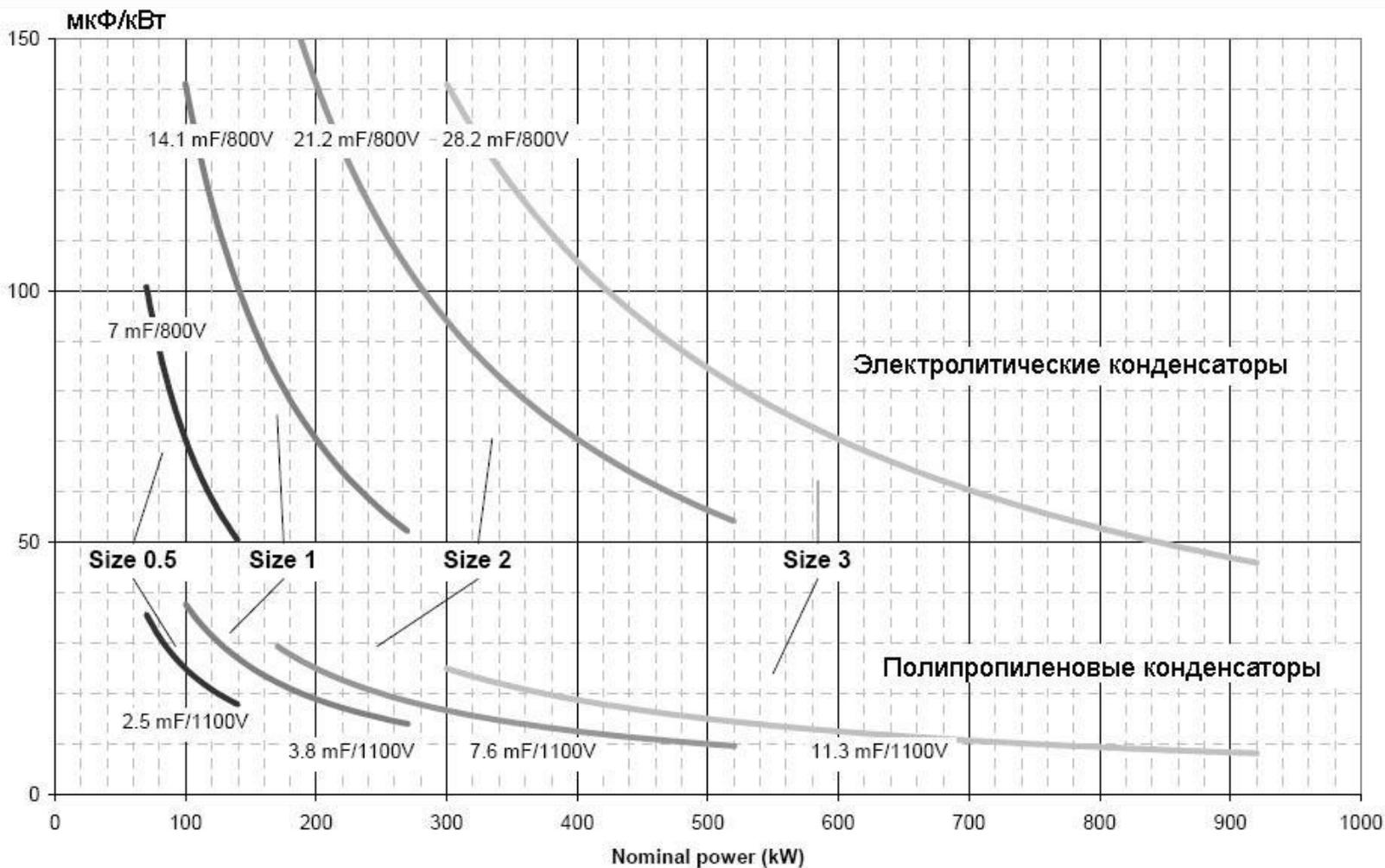
**Однако:**

**правило справедливо только для эл-литов и не учитывает:**

- реальную нагрузочную способность конденсаторов;
- рабочую температуру и срок службы
- внедрение новых технологий конденсаторов
- Для ПП конденсаторов удельная емкость на 1A примерно в 3 раза ниже (без охлаждения), т.е. 0,02...0,03 мФ на 1A.  
ESR примерно в 10 раз меньше, т.е. удельная емкость м.б. 0,006...0,008 на 1A с принудительным охлаждением.

# Нормы SEMIKRON для сборок SEMIKUBE

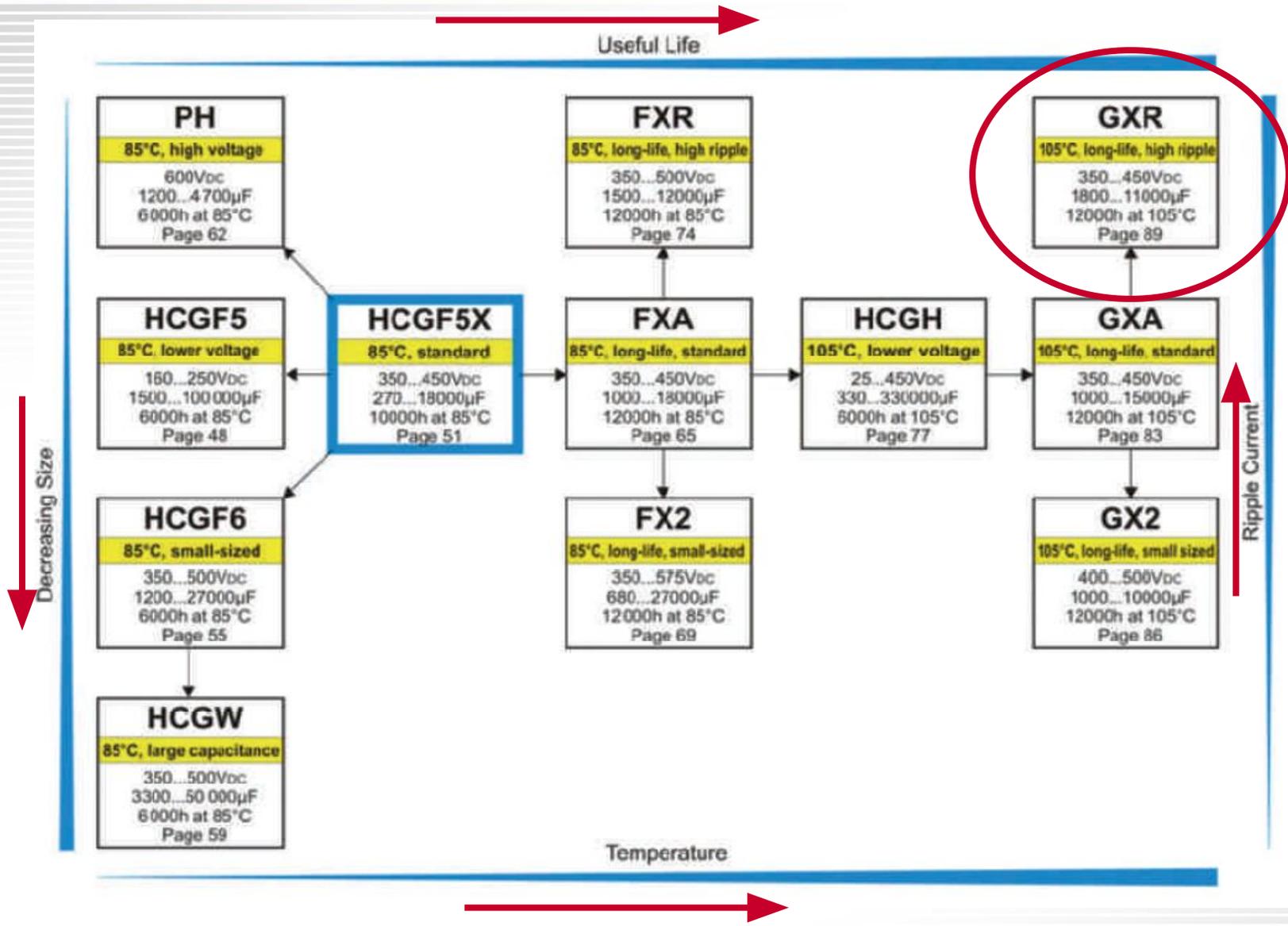
Соотношение мкФ/кВт для различных типов модулей SEMIKUBE



- **Напряжение**
  - Номинальное напряжение (без перегрузки)
  - Пиковое напряжение
  - Способность к поглощению энергии в случае аварии (например, при выбеге генератора или разряде индуктивности) вплоть до выключения
- **Величина “С”**
  - **Макс. допустимый ток** ( $\leftrightarrow$  Срок службы)
  - Стабильность DC напряжения (уровень пульсаций VDC)
  - Время разряда (условия безопасного сброса энергии)
  - Способность к поглощению энергии в случае аварии (например, при выбеге генератора или разряде индуктивности) вплоть до выключения
- **Паразитные параметры**
  - Экв. Сопротивление ESR  $\rightarrow$  чем меньше ESR, тем ниже потери, выше импульсные токи, выше рабочая температура
  - Экв. Индуктивность ESL  $\rightarrow$  чем ниже ESL, тем ниже коммутационные всплески напряжения
- **Срок службы**

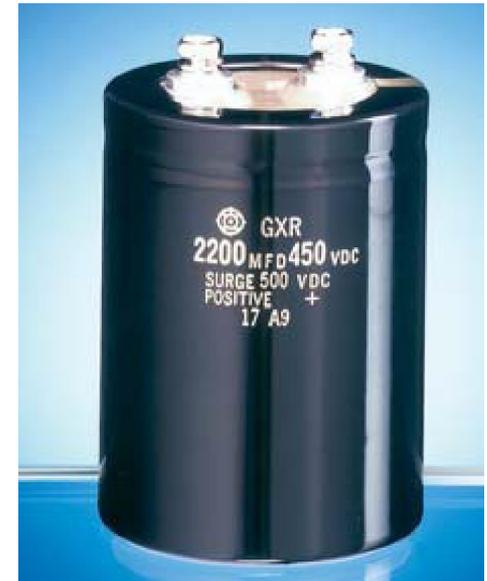
- **Электролиты:**
  - Преимущества:
    - Выше удельная емкость
    - Выше ESR - демпфирование паразитных контуров
  - “Стандарт” для большинства низковольтных применений (< 800-900 Vdc)
  - При напряжении выше 400...500V → требуется последовательное соединение
- **Полипропилен:**
  - Преимущества
    - Выше рабочее напряжение – не нужно последовательное соединение и выравнивающие резисторы
    - Выше импульсные токи и надежность
    - Выше перегрузочная способность
  - Недостатки :
    - Ниже удельная емкость, при одинаковом объеме:  $C_{\text{polyprop}} \ll C_{\text{electrolytic}}$
    - Выше цена, вес и габариты (при одинаковой емкости), примерно одинаковые показатели с учетом меньше удельной емкости
    - Выше EMI из-за меньшего ESR

# Пример: Электролиты Hitachi



# Параметр: Рабочее напряжение

- Диапазон рабочих напряжений
  - Эл-литы: 350 ...600В
  - Полипропилен: ...2000В
- Макс. напряжение DC-шины  $\leq$  номинальное напряжение конденсатора,
  - Перегрузка по напряжению существенно сокращает срок службы
  - **Для ПП конденсаторов нормируется уровень и длительность перенапряжения**
- Пример:  $V_{CC(nom)} = 1100В \rightarrow 3 \times 400В$  эл-лита последовательно



Hitachi AIC, product catalogue

- Способность к поглощению энергии в аварийном режиме (разряд индуктивности, выбег генератора, энергия не поступает в сеть)
  - Накопление энергии от генератора (ВЭУ) в DC шине до срабатывания автомата защиты или аварийного байпаса
  - Пример: сброс 1МВт за 20 мс →  $E = 20.000 \text{ Вт}\cdot\text{с}$ ;  $C_{\text{tot}} = 23 \text{ мФ}$ ,  $V_{\text{CC}}(t=0) = 1100\text{V}$
  - Какое будет напряжение  $V_{\text{CC}}$  через 20 мс?

$$E = \frac{C}{2} \cdot (V_{\text{CC}}(t_{\text{end}})^2 - V_{\text{CC}}(t=0)^2) \quad \rightarrow \quad V_{\text{CC}}(t_{\text{end}}) = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{C} + V_{\text{CC}}(t=0)^2}$$

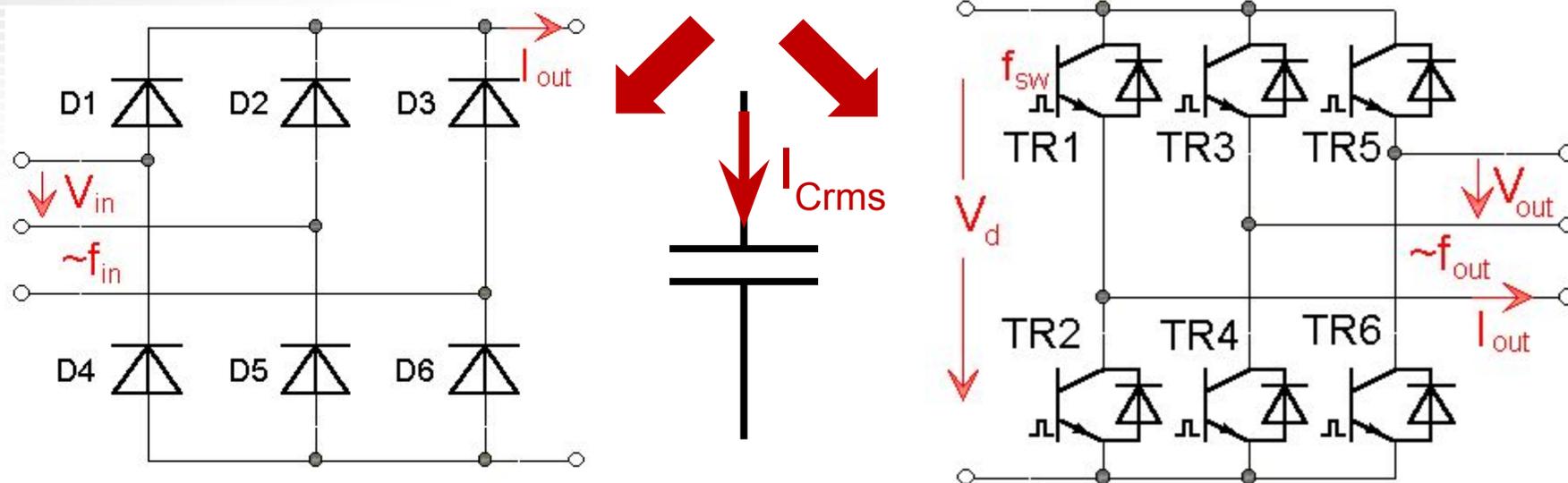
$$V_{\text{CC}}(t = 20\text{ms}) = \sqrt{\frac{2 \cdot 20\text{kWs}}{23\text{mF}} + 1100\text{V}^2}$$

$$V_{\text{CC}}(t = 20\text{ms}) = 1720\text{V}$$

- Превышение макс. напряжения конденсаторов и  $V_{\text{ces}}$  1700V IGBT,
- Возможные решения:
  - увеличение “С”,
  - Уменьшение времени реакции □ 5ms,
  - 4 x C последовательно, SKiiP - off, мощность рассеивается через аварийный байпасный ключ

## Схема В6U + В6СI

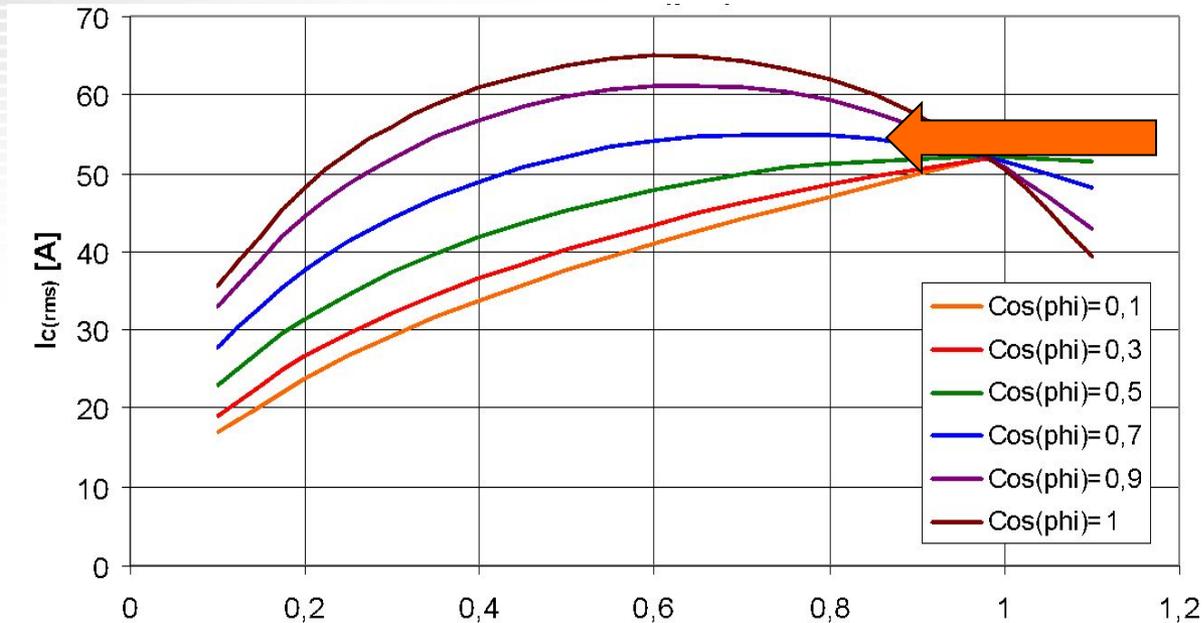
Анализ режимов работы инвертора / выпрямителя



- Суперпозиция токов DC-шины инвертора и выпрямителя
- Вариант: 4Q привод - 2 инвертора с общей DC-шиной

# Расчет тока DC конденсаторов ШИМ-инвертора

Ток DC-шины (на частоте ШИМ) при  $I_{out}=100A$  в зависимости от  $\cos(\phi)$  и коэффициента модуляции  $M$



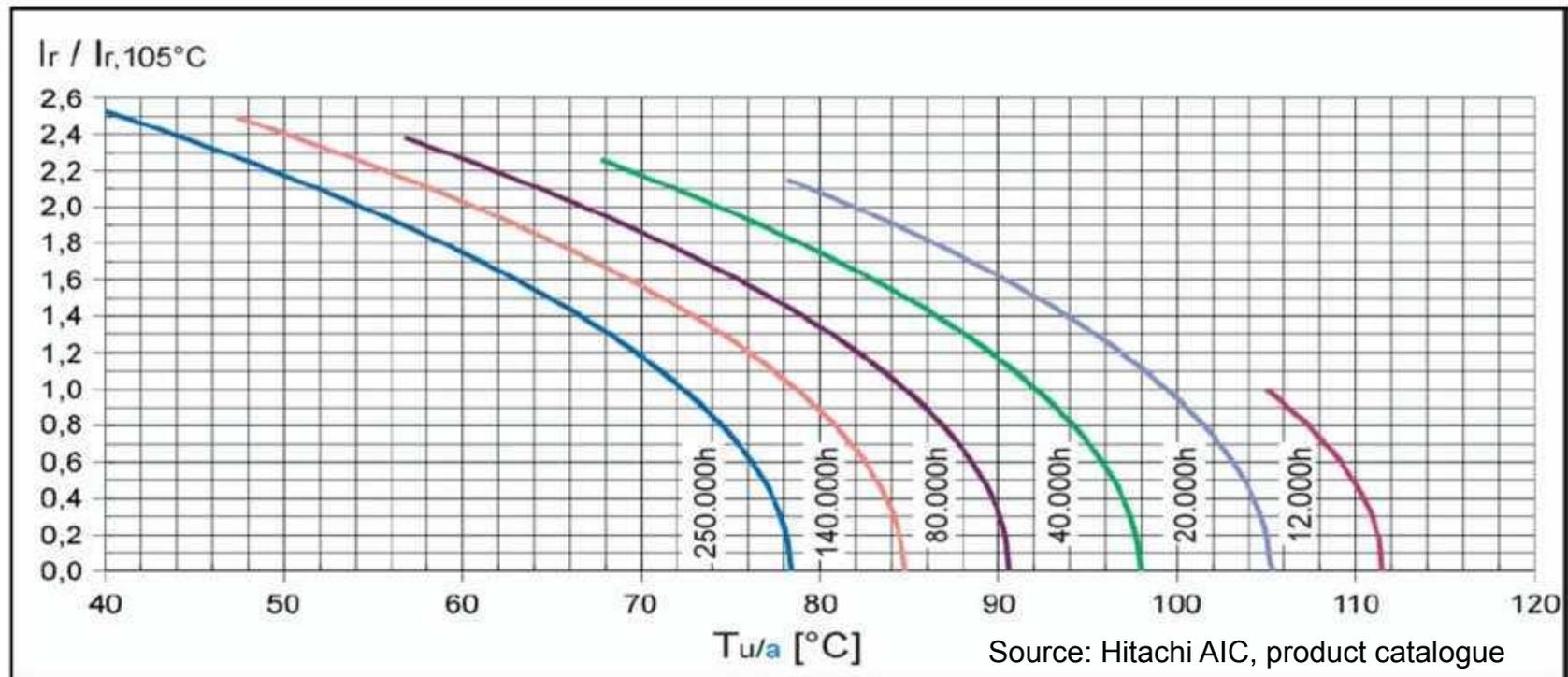
$$I_{C(rms)} = 3 \cdot M \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\varphi) \cdot \frac{I_{out(rms)}}{4} \cdot \sqrt{\frac{0.98 \cdot \cos(\varphi)^2 + 0.245}{M \cdot \cos(\varphi)^2} - 1}$$

При  $M=0.8 \dots 1$ ,  $\cos(\varphi)=0.8 \dots 1 \rightarrow I_{C(rms)} = 55\%$

$$I_{out} = 1000A \rightarrow I_{C(rms)} = 550A$$

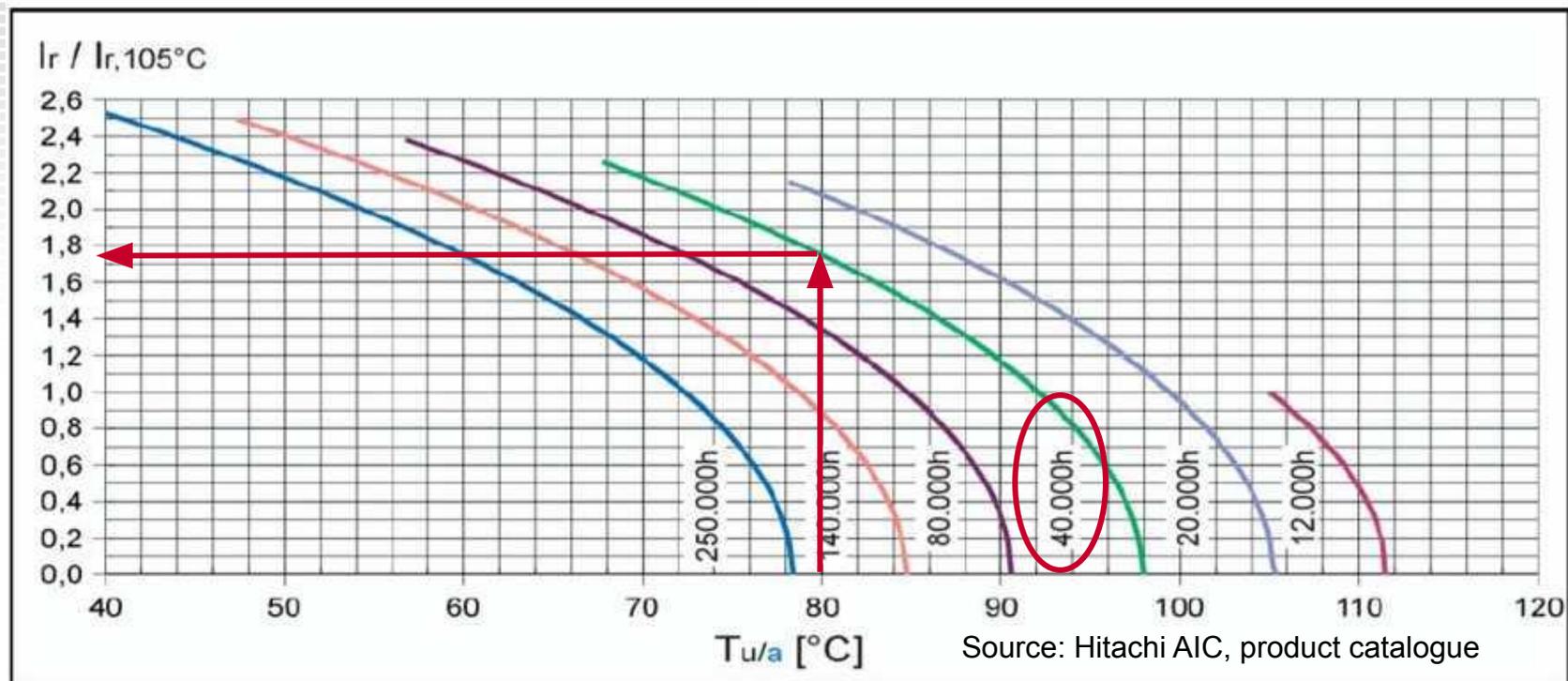
# Расчет срока службы для эл-лит. С

- Срок службы 1 конденсатора = срок службы банка конденсаторов
  - Определяющий параметр надежности С:  $T_{hs}$  - температура «горячей» точки
  - Оценка  $I_{rms}$  1 конденсатора в банке С
- Производители определяют зависимость срока службы от тока RMS и  $T_a$
- Пример: 400В «силовой» конденсатор Hitachi (12.000ч/105°C)



# Пример расчета срока службы

- 40.000ч (4,5 года), полная нагрузка при  $T_a = 80^\circ\text{C}$



- $I_r / I_{r(105^\circ\text{C})} = X_i = 1,75$
- В режиме принудительного охлаждения допускается больший ток

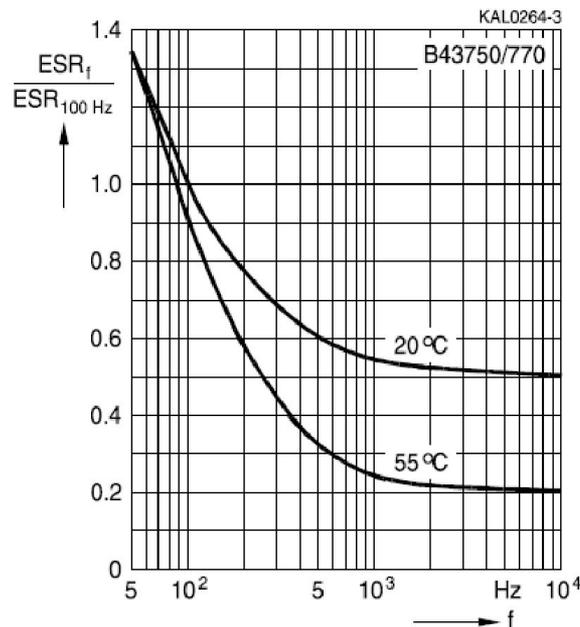
# Частотные характеристики ESR и $I_{AC(rms)}$

- ESR снижается с ростом частоты
  - Допустимый ток пульсаций  $I_{rms} / f_{sw}$  – растет (см. Datasheet):

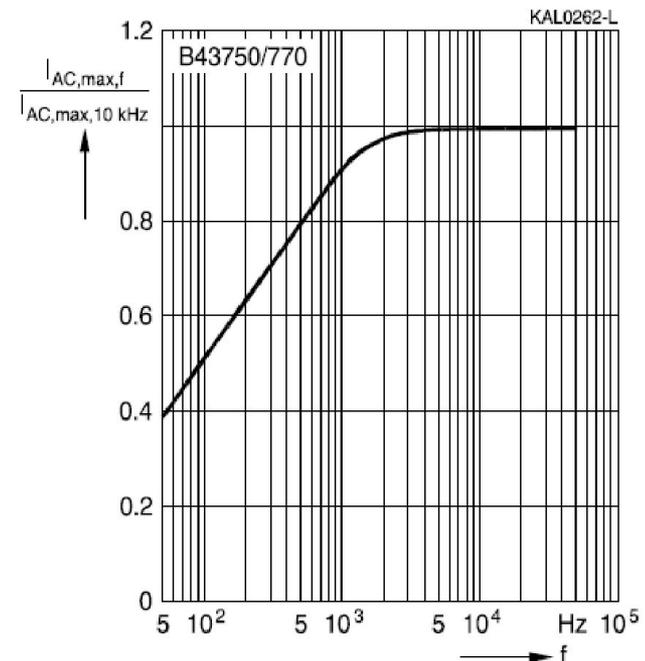
$$\text{Hitachi } X_f(>1 \dots 10\text{kHz}) = 1.3 * I_{rms}(120\text{Hz})$$

$$\text{Epcos } X_f(> 3 \text{ kHz}) = 2 * I_{rms}(100\text{Hz})$$

Frequency characteristics of ESR  
Typical behavior



Frequency factor of permissible ripple current  $I_{AC}$



Source: Epcos, data sheet for Electrolytic capacitors with extremely high ripple current

- Наивысшая амплитуда гармоник (100%-FFT) на частоте  $2 * F_{sw}$
- $f_{out}$  (основная частота) почти не влияет на ток DC-шины ( $< 5\%$ )

# Пример расчета DC емкости, эл-лит

- Инвертор:  $I_{out} = 1000A$ ,  $690VAC$ ,  $V_{cc} = 1100VDC$ 
  - $I_{C(rms)} = 0,55 * I_{out} = 550A$
  - Частотный к-т  $X_f = 1,3$  ( $f_{sw} > 1kHz$ )
  - Токвый к-т  $I_r / I_{r(105^\circ C)} = X_i = 1,75$

Nennspannung Rated Voltage Code (Spitzenspannung) (Surge Voltage) [V DC]	Kapazität Capacitance [µF]	Max.	Max.	ESR (typ) bei / at 20°C/100Hz	Zmax bei / at 20°C/10kHz	ESL (typ) [nH]	DxL [mm]	Gewicht Weight [g]
		Wechselstrom Ripple Current bei / at 40°C/120Hz	Wechselstrom Ripple Current bei / at 105°C/120Hz					
		[A RMS]	[A RMS]					
<b>400</b>	<b>3 300</b>	31,3	<b>12,5</b>	21	22	22	64x131	720
(450)	4 700	45,8	18,3	16	14	23	77x137	1100



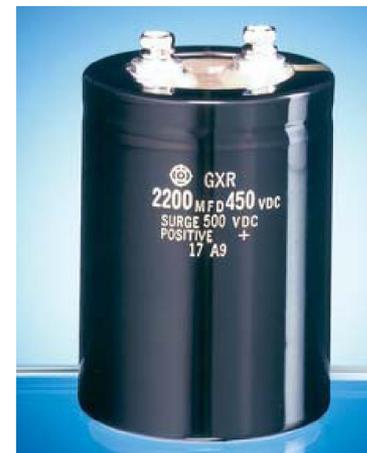
Source: Hitachi AIC, product catalogue

- $I_{C(nom)} = 12,5A$  (@105°C, 120Hz) на 1 конденсатор
  - $I_{Cop}^* = 12,5A * 1,3 * 1,75 = 28,5A$  на 1 конденсатор (@ Ta=80°C, 3кГц)
  - $n = 550A / 28,5 = 19,3 // C \rightarrow 7^\circ C$  на фазу = 21°C
- 21°C x 3.3мФ (7°C на фазу) = 70мФ **(соответствует основному правилу!)**
- $V_{dc} = 1100V \rightarrow 3 * C$  последовательно
  - 3 x 21 = 63 конденсатора
- Общая емкость = 3,3мФ \* 21/3 = 23мФ

# Пример расчета DC емкости, эл-лит

- Инвертор:  $I_{out} = 1000A$ ,  $690VAC$ ,  $V_{cc} = 1100VDC$ 
  - $I_{C(rms)} = 0,55 * I_{out} = 550A$

Nennspannung Rated Voltage Code (Spitzenspannung) (Surge Voltage) [V DC]	Kapazität Capacitance [μF]	Max. Wechselstrom Ripple Current bei / at 40°C/120Hz [A RMS]	Max. Wechselstrom Ripple Current bei / at 105°C/120Hz [A RMS]	ESR (typ) bei / at 20°C/100Hz [mΩ]	Zmax bei / at 20°C/10kHz [mΩ]	ESL (typ) [nH]	DxL [mm]	Gewicht Weight [g]
400	3 300	31,3	12,5	21	22	22	64x131	720
(450)	4 700	45,8	18,3	16	14	23	77x137	1100



Source: Hitachi AIC, product catalogue

- $4,7m\Phi$ :  $I_{Cop}^* = 18,3A * 1,3 * 1,75 = 41,6A$  на 1 конденсатор =  $13,2 // C$  parallel
  - $n = 550A/41,6A = 13,2 // C \rightarrow 5 * C$  на фазу =  $15 * C$
  - $15 * C$  ( $5 * C$  на фазу) в параллель,  $3 * C$  последовательно
  - $C = 4,7m\Phi * 15/3 = 23m\Phi$
  - $120 * 24 * 13 \text{ cm}^3 = 37 \text{ л}, 50 \text{ кг!}$  (Без учета шин и крепежа)...

# ПП конденсаторы, пример расчета 1



$C_N$ (µF)	$R_s$ (mΩ)	$R_{th}$ (K/W)	$I_{max}$ (A)	$\hat{I}$ (kA)	$I_s$ (kA)	$W_N$ (Ws)	$L_e$ (nH)	$D_1 \times L_1$ (mm)	Design	m (kg)	order no. Bestell-Nr.	pcs / Stk / Box
U <sub>N</sub> 1300V DC			U <sub>S</sub> 1950V		U <sub>r</sub> 300V		U <sub>BB</sub> 1950V DC		U <sub>BG</sub> 3000V AC			
300	1.2	3.7	60	4.0	12.0	254	40	∅ 85 × 155	NT	1.0	E50.N15-304NT0	5 / FB8
545	0.62	2.3	80	7.2	21.6	461	40	∅ 116 × 165	NT	1.9	E50.R16-554NT0	3 / FB8
560	1.8	2.3	60	4.0	12.0	473	60	∅ 85 × 252	NT	1.6	E50.N25-564NT0	5 / FB9
820	0.60	1.7	100	10.9	32.7	693	50	∅ 116 × 230	NT	2.5	E50.R23-824NT0	3 / FB9
1090	0.63	1.4	100	14.5	43.5	946	60	∅ 116 × 295	NT	3.2	E50.R29-115NT0	3 / FB10
1370	0.83	1.1	100	10.9	32.7	1158	70	∅ 116 × 345	NT	3.5	E50.R34-145NT0	3 / FB11
1560	0.59	1.1	120	20.7	62.1	1318	70	∅ 136 × 295	NT	4.5	E50.S29-165NT0	3 / FB13
1950	0.74	0.9	120	15.5	46.5	1648	70	∅ 136 × 345	NT	5.3	E50.S34-205NT0	2 / FB13

Source:  
[www.electronicon.com](http://www.electronicon.com)

	Эл-лит	ПП	ПП	Примечание
C	23мФ	12x0.3мФ =3.6мФ	16%	Уровень пульсаций напряжения? Накопление энергии в аварийном режиме?
$I_{C(rms)}$	550A	720A	131%	
$L_{phase}$	38nH	13.3nH	35%	
Вес	50 kg	12kg	24%	
Объем	37 л	13 л	35%	
T	40.000h	Fit=250*10 <sup>-9</sup>	1000%	При 80°C, 1100V

# ПП конденсаторы, пример сборки инвертора

## SKS B2 140 GD 69/12 U - MA PB



SKiIP stack

Absolute maximum ratings <sup>1)</sup>			
Symbol	Conditions	Values	Unit
$I_{OUT\ MAX}$	Maximum permanent output current	1 400	$A_{RMS}$
$I_{IN\ MAX}$	Maximum permanent input current	1 800	$A_{DC}$
$V_{OUT\ MAX}$	Maximum output voltage	760	$V_{AC}$
$V_{BUS\ MAX}$	Maximum DC Bus voltage	1 300	$V_{DC}$
$F_{OUT\ MAX}$	Maximum inverter output frequency	100	Hz
$F_{SW\ MAX}$	Maximum switching frequency	5	kHz

Electrical characteristics: application example		T <sub>AMBIENT</sub> =40°C unless otherwise specified			
Symbol	Conditions	min	typ	max	Unit
<b>AC phase</b>					
$V_{BUS}$	DC bus rated voltage		1 250		$V_{DC}$
$I_{OUT\ RATED}$	Rated output current		1 400		$A_{RMS}$
$I_{OUT\ OVL}$	Overload output current		1 540		$A_{RMS}$
$t_{OVL}$	Overload duration		60		s
$T_{OVL}$	Time between 2 overloads		10		min

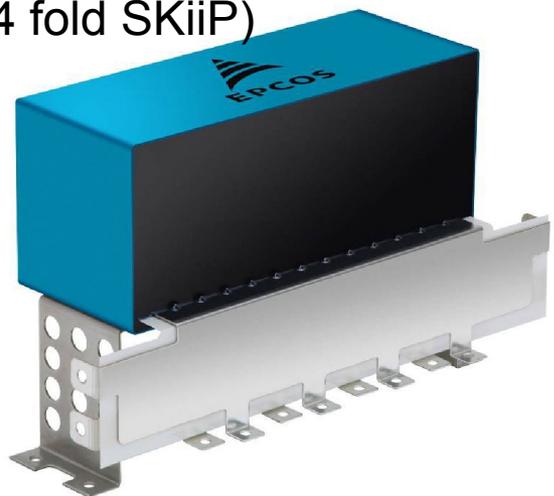
T<sub>INLET</sub>=45°C, 50% glycol,  
Flowrate = 16 L/min

## Сборка инвертора SKS B2 140 GD 69/12

- $I_{out} = 1400\ A_{RMS}$
- $I_{dc} = 1800\ A$
- $C_{dc} = 8,1\ мФ / 1250\ В (0,006\ мФ/А!)$ , принуд. охлаждение
- Срок службы LTE = 100.000 ч
- Вес – 106 кг
- Габариты – 203 x 513 x 1400

# ПП конденсаторы, пример расчета 2

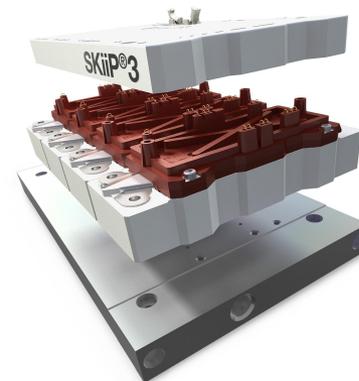
фазный банк конденсаторов  
(4 fold SKiiP)



Source: Epcos,  
product catalogue

## Characteristics

$C_R$	1000 $\mu\text{F} \pm 10\%$
$V_R$	900 V DC
$W_R$	405 Ws
$I_{\text{max}}$	200 A
$L_{\text{self}}$	15 nH
$\tan \delta_0$	$2 \cdot 10^{-4}$
$R_s$	0.6 m $\Omega$



## Design data

Dimensions l x w x h

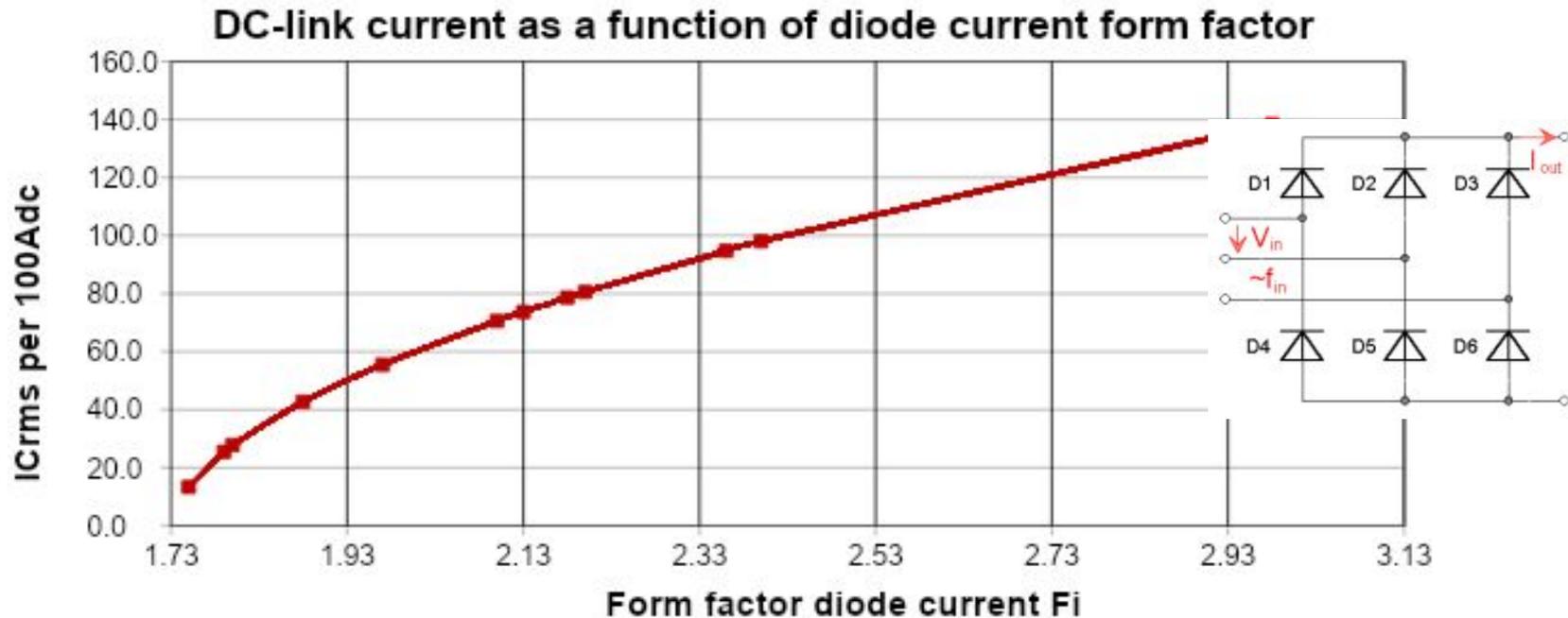
280 x 110 x 120 mm

Approx. weight

4.5 kg

	Эл-лит	ПП	ПП	Примечание
C	23мФ	3мФ	13%	Уровень пульсаций напряжения? Накопление энергии в аварийном режиме?
$I_{C(\text{rms})}$	550A	600A	110%	
$L_{\text{phase}}$	38nH	15nH	40%	
Вес	50 kg	13,5kg	37%	
Объем	37 l	11 l	30%	
T	40.000h	80.000	200%	$T_a = 80^\circ\text{C}$

## Ток DC-шины в зависимости от форм-фактора диода $F_i$



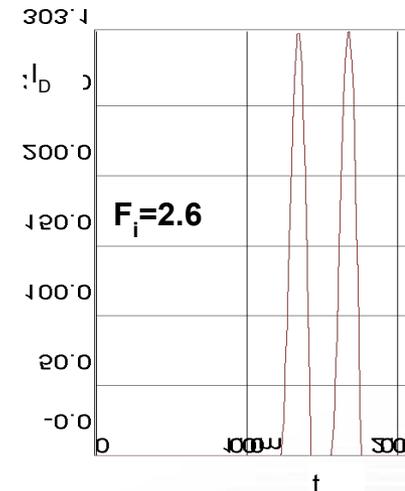
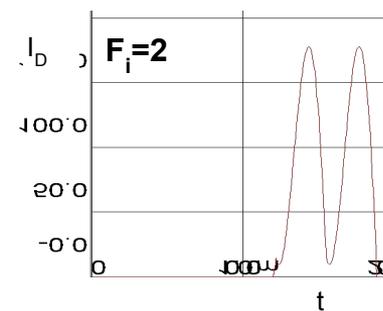
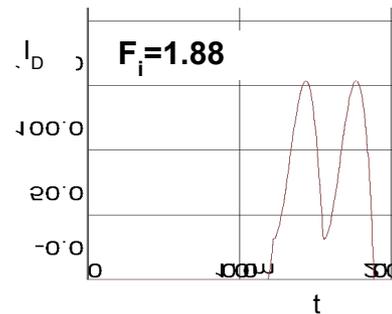
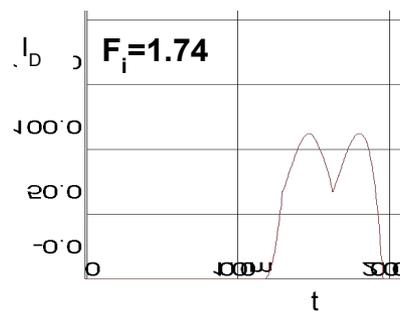
$$I_{C(rms)R} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{out(dc)} \cdot (F_i - \sqrt{3})^{0.55}$$

$$F_i = \frac{I_{Diode(rms)}}{I_{Diode(av)}}$$

# Форм-фактор $F_i$

- Форм-фактор (sin форма сигнала) зависит от:
  - Емкости DC шины: меньше  $C \rightarrow$  выше  $F_i$
  - Индуктивности AC цепи (фильтры, трансформаторы): меньше  $L \rightarrow$  выше  $F_i$
  - Индуктивности DC цепи (DC дроссели): меньше  $L \rightarrow$  выше  $F_i$
  - Схема выпрямителя (3-фазный, 1-фазный, неуправляемый, управляемый)

Ток 1 диода, пример для  $I_{DC} = 100A$ :



# Общий ток конденсаторов DC-шины

- Ток DC-шины выпрямителя рассчитывается с учетом частотного к-та, (например, на 300Гц  $X_{f(300\text{Hz})} = 1,1$ )
- Наложение токов конденсаторов инвертора и выпрямителя, нормализованных для номинальной частоты (100Гц или 120Гц в спецификации конденсатора)

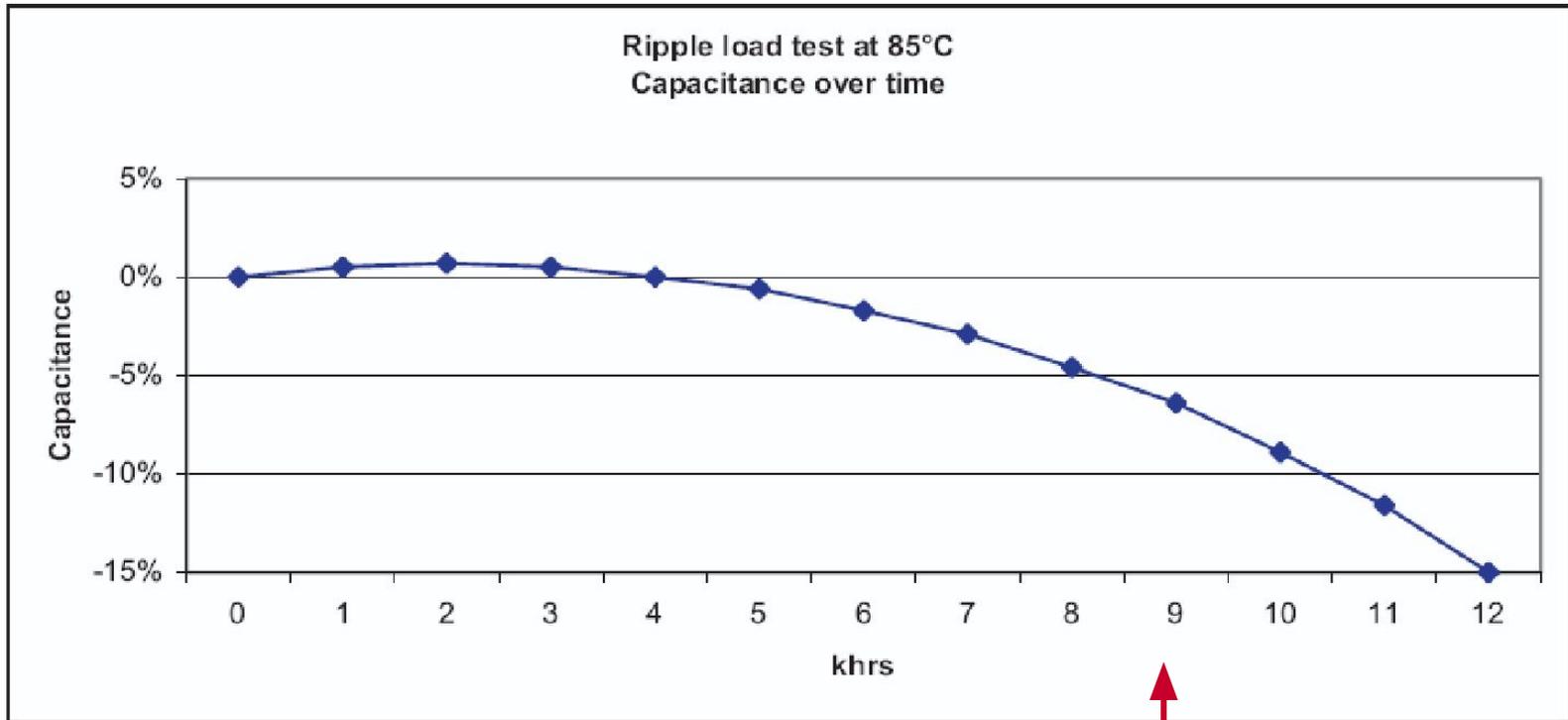
$$I_{\text{Crms}} = \sqrt{\left(\frac{I_{\text{Inverter}}}{X_{f(\text{kHz})}}\right)^2 + \left(\frac{I_{\text{Rectifier}}}{X_{f(300\text{Hz})}}\right)^2}$$

- Расчет с учетом срока службы  $C$ , как показано ранее
- Общий ток  $I_{\text{Crms}}$  определяет необходимое кол-во конденсаторов (кроме других требований)
- Если срок службы задан для определенной температуры корпуса конденсатора  $T_c$ :
  - Расчет  $I_{\text{Crms}}$
  - Расчет потерь  $P_C = I_{\text{Crms}}^2 * \text{ESR}$
  - Расчет температуры  $T_C = R_{\text{th}} * P_C + T_a$

# Зависимость параметров от срока службы

- Потеря емкости в процессе эксплуатации

- -15% до окончания срока службы → 17% (=1/0.85) начальное значение емкости д.б. выше расчетной  $C(t=0) = 1.17 * C_{\text{required}}$



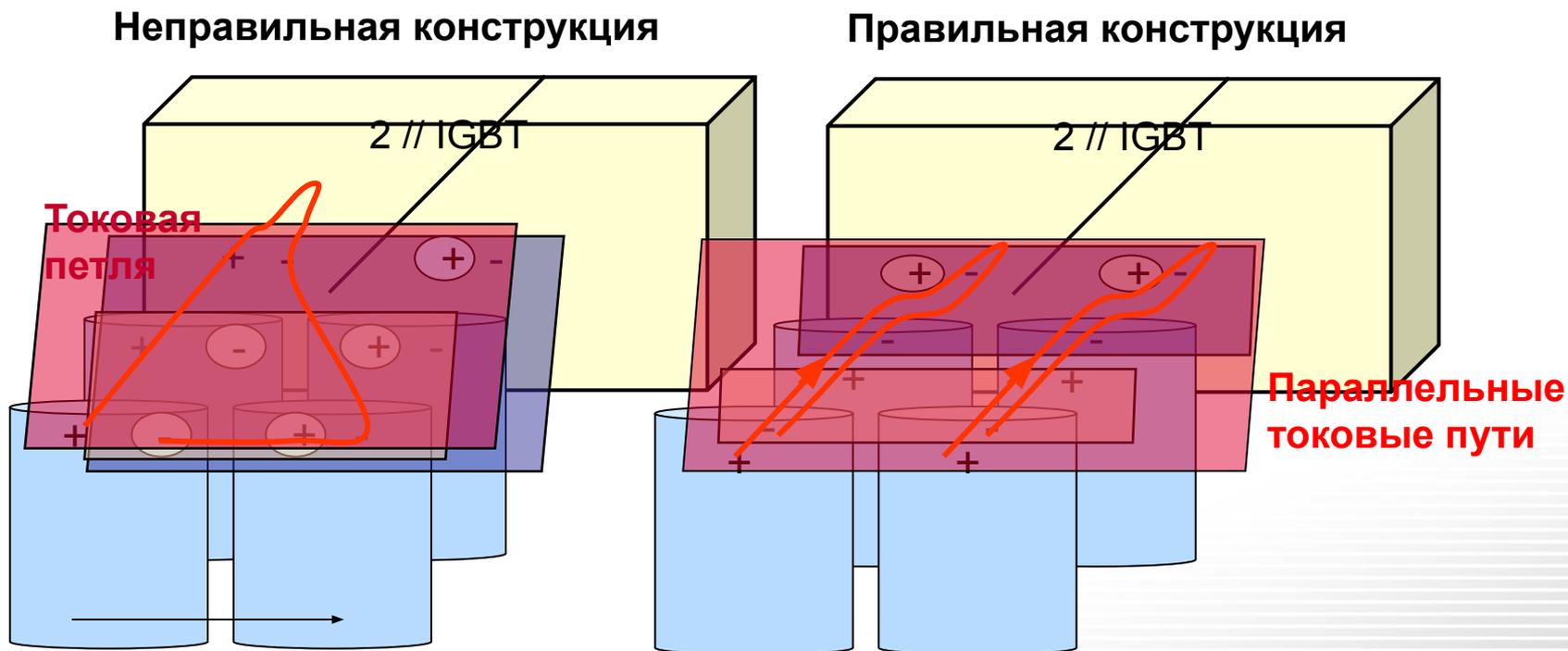
1 год ?!

Source: Hitachi AIC, product catalogue

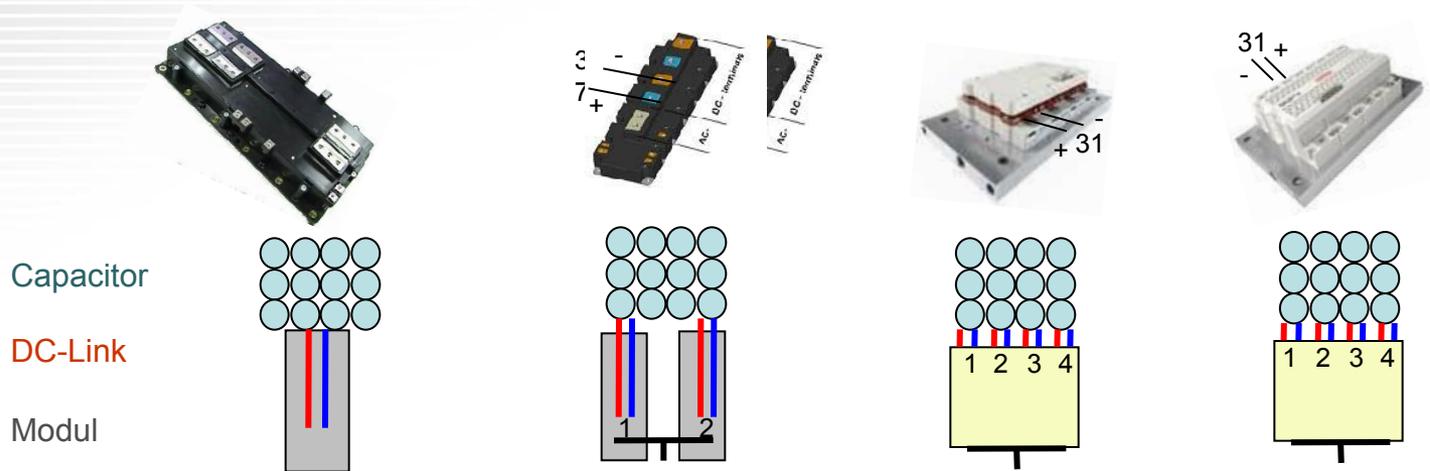
- **Обеспечение надежности**
  - Лучше использовать общий банк DC-конденсаторов для 3-фазного инвертора, в противном случае (3 отдельных блока) возникают большие уравнивающие токи между отдельными блоками конденсаторов (нужны копланарные соединения)
  - Параллельное соединение инверторов лучше, чем параллельное соединение IGBT в фазе
  - DC предохранители между банками DC-конденсаторов параллельных инверторов
  - По возможности: 1 конденсатор (или последовательное соединение) на 1 полумостовой модуль (или элемент – SKiiP, SKiM)
- **Требования по монтажу**
  - Хороший отвод тепла: конденсаторы не должны быть близко друг к другу
  - Длинные корпуса с малым Ø лучше охлаждаются, чем короткие с большим Ø
  - Желательно использовать конденсаторы с дополнительным креплением в верхней части
  - Исключение динамических нагрузок: динамометрические ключи, жесткие допуски на отверстия, отсутствие тянущих усилий на терминалах
  - В документации иногда указывается предпочтительная ориентация в пространстве
- **Транспортировка / хранение / монтаж**
  - В одном блоке лучше использовать конденсаторы из одной партии (распределение токов)
  - Хранение в сухих, теплых помещениях не более года
  - Ежегодный реформинг (эл-литы)

# Низкоиндуктивная DC-шина

- Желательно - один конденсатор (или последовательное соединение) на полумостовой модуль или элемент (SKiiP, SKiM) – см. следующий слайд
- Прямые токовые пути, без углов и изгибов...
- Копланарная DC-шина
- Избегайте токовых петель (см. рисунок):
  - 2 конденсатора последовательно
  - 2 конденсатора параллельно

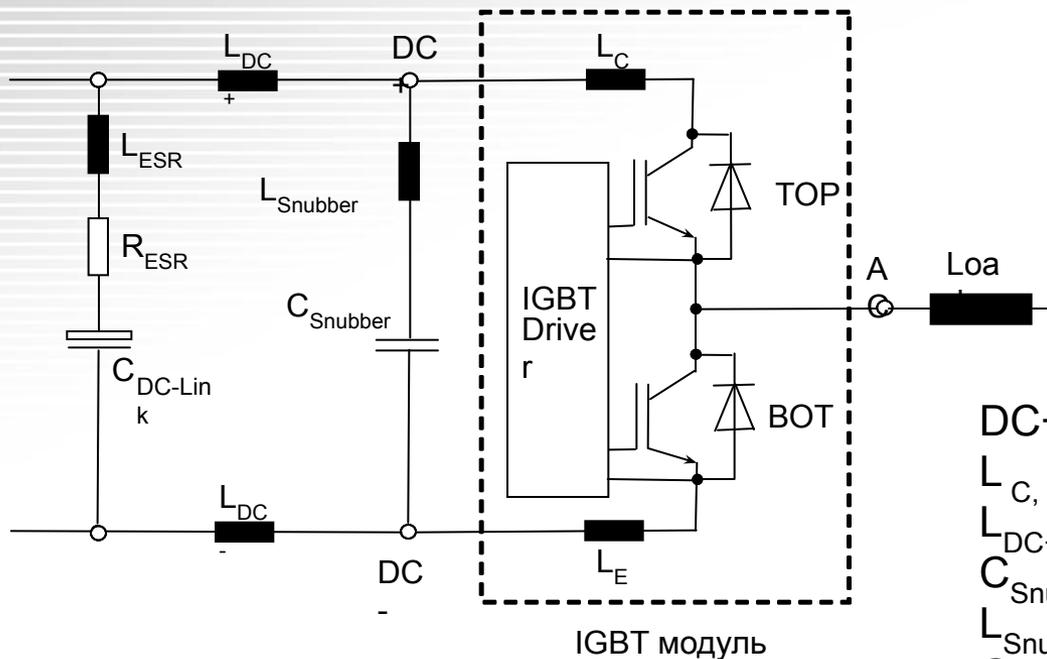


# DC-шина - внешняя паразитная индуктивность $L_S$



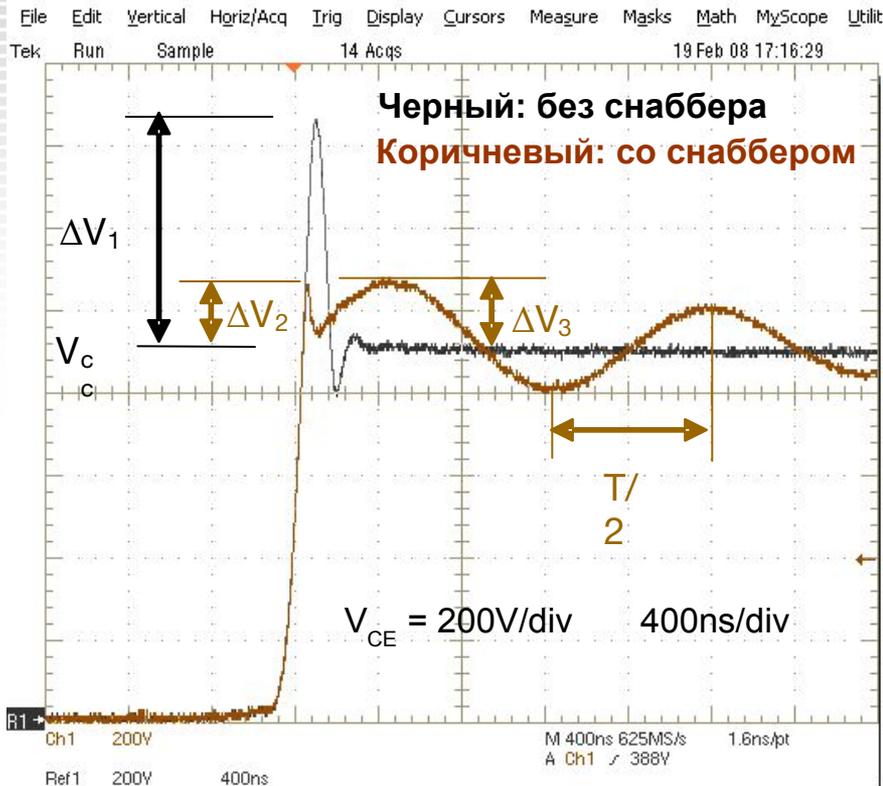
$L_S$ с учетом DC-шины	↑↑	↑	↓	↓
Перенапряжение	↑↑	↑	↓	↓
Общая оценка	●●	●	●	●

# Снабберные конденсаторы



- DC+, DC-, AC терминалы IGBT
- $L_C, L_E$  паразитные L модуля
- $L_{DC+}, L_{DC-}$  паразитные L DC-шины
- $C_{Snubber}$  Емкость снаббера
- $L_{Snubber}$  Индуктивность снаббера
- $C_{DC-link}$  Емкость DC-шины
- $L_{ESR}, R_{ESR}$  Паразитные L, R DC-шины

# Типовые кривые $V_{CE}$ со снаббером и без него



$$\Delta V_1 = \Sigma L * di_c / d$$

$$\Delta V_2 = (L_C + L_E + L_{Snubbe}) * di_c / d$$

$$\Delta V_3 \leq \sqrt{\frac{L_{DC-Lin} * i_c^2}{C_{Snubbe}^k}}$$

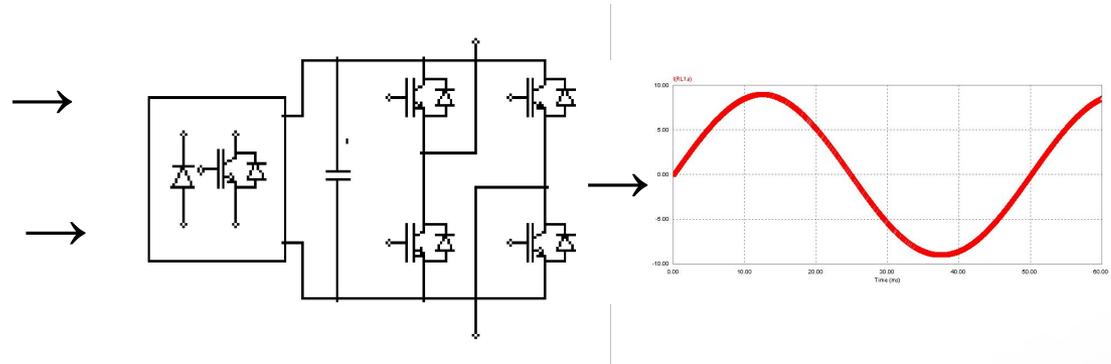
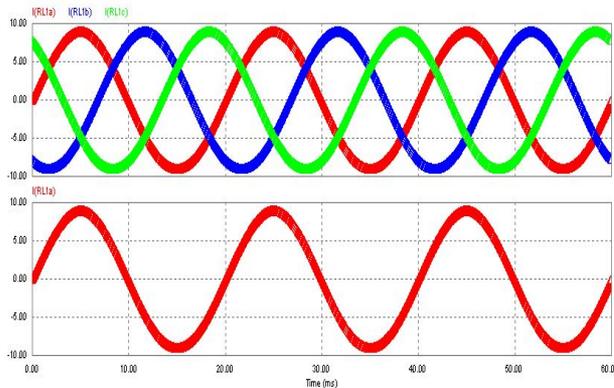
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L_{DC-Lin} * C_{Snubbe}^k}}$$

$$\Sigma L = L_C + L_E + L_{DC+} + L_{DC-} + L_{ESR}$$

$$L_{DC-Lin} = L_{DC+} + L_{DC-} + L_{ESR}$$

# Емкость DC шины ячейки MLI

- Входной источник питания может быть 3-фазным или однофазным.
- Рассматривается случай однофазной ячейки с 3-фазным выпрямителем и 1-фазным выпрямителем с ККМ (частота выходного напряжения  $F_{out}$  от 70 Гц до 1 Гц).



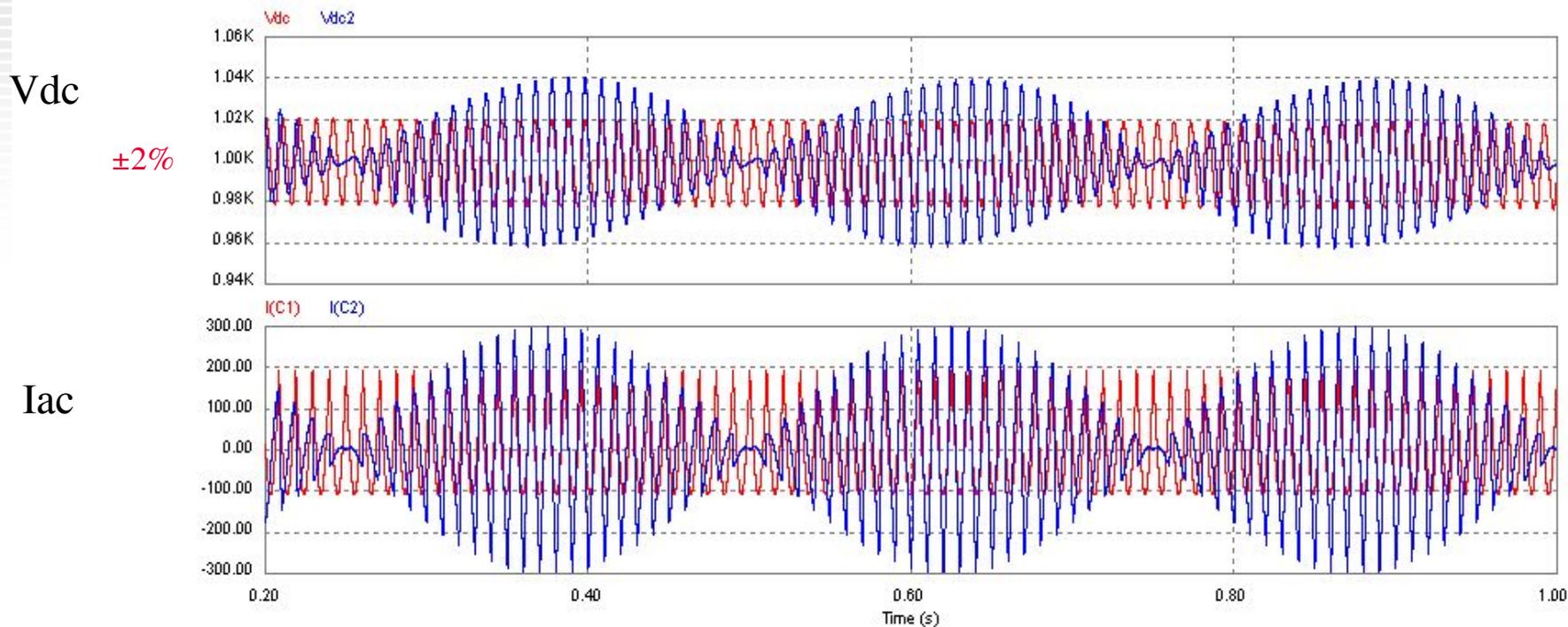
Номинальный ток ячейки  $I_{out} = 300\text{A}$

Емкость DC (ПП) шины  $C_{dc} = 10\text{ мФ} \rightarrow 0,03\text{ мФ/А}$

**Согласуется с основным правилом для ПП конденсаторов**

# Напряжение и пульсаций емкости DC-шины

Выходной ток ячейки 300A<sub>peak</sub> (F<sub>out</sub> = 48Гц, номинальная мощность), F<sub>sw</sub> = 1кГц



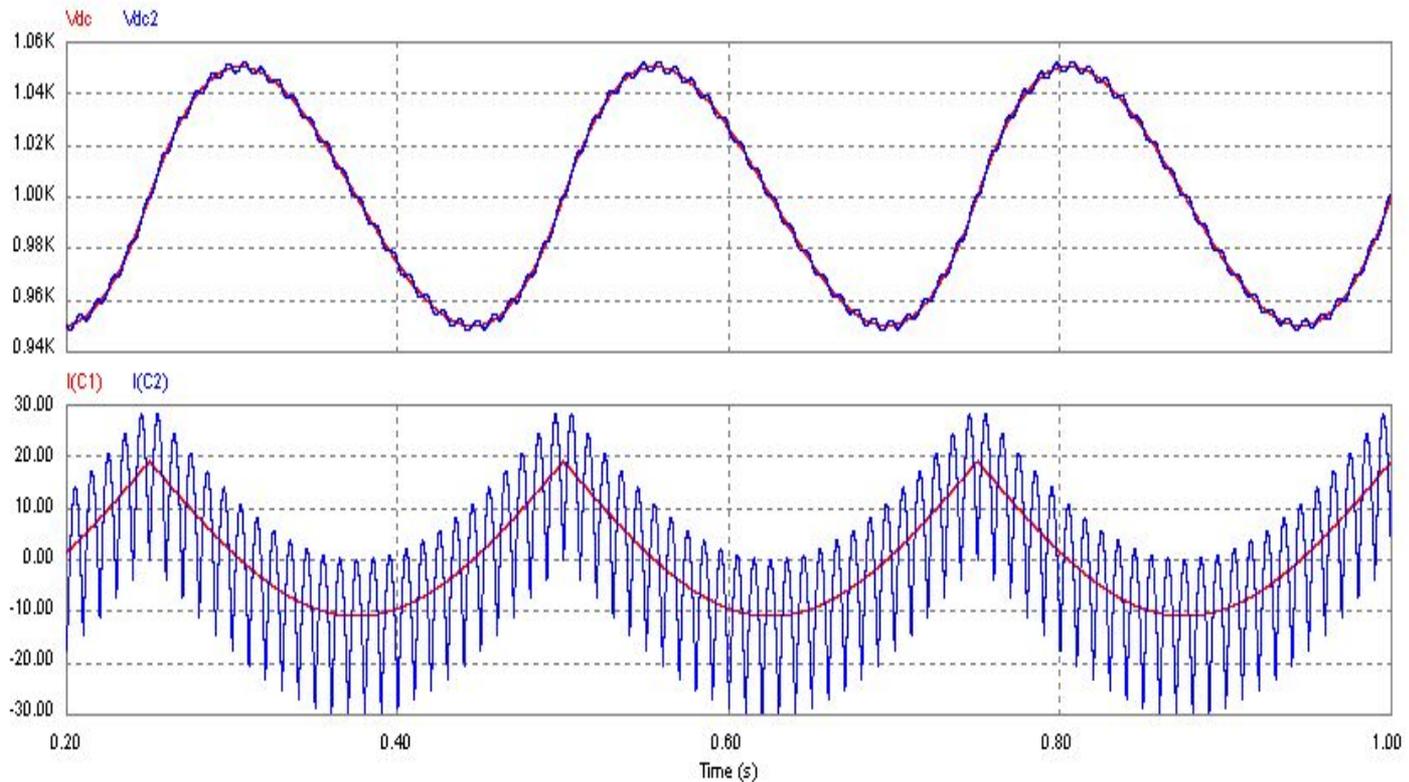
$C_{dc} = 10\text{мФ}$

Выходной ток ячейки 300А реак при  $f_{out} = 2\text{Гц}$   
(10% номинальной мощности)

Vdc

±5%

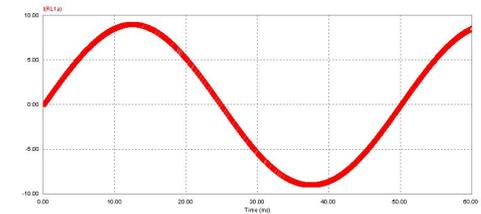
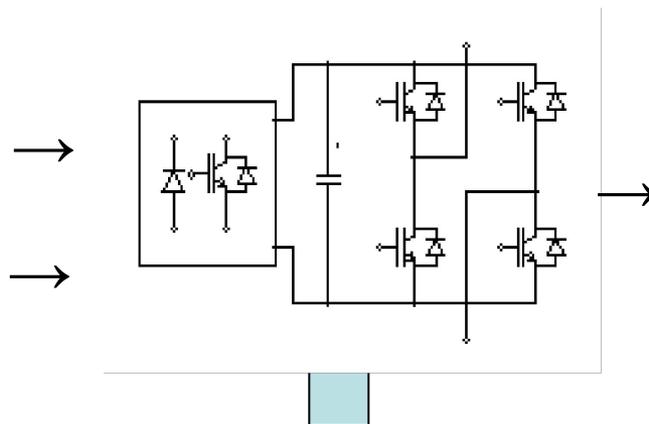
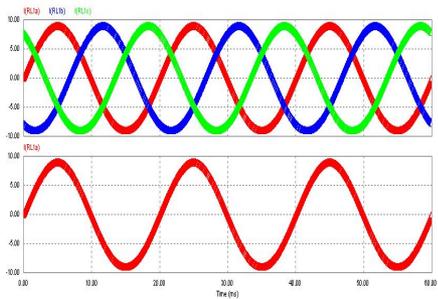
Iac



$C_{dc} = 10\text{мФ}$

# Емкость DC шины однофазной ячейки MLI

- Требования по напряжению пульсаций определяют емкость DC-шины, выходной ток ячейки также является важным фактором при нормировании  $C_{dc}$
- Для однофазной ячейки MLI инвертора требуется такая же емкость DC-шины, как для 3-фазной 2L инвертора
- При использовании ККМ выпрямитель может быть 1-фазным при такой же величине  $C_{dc}$



**Спасибо за внимание!  
Вопросы?**