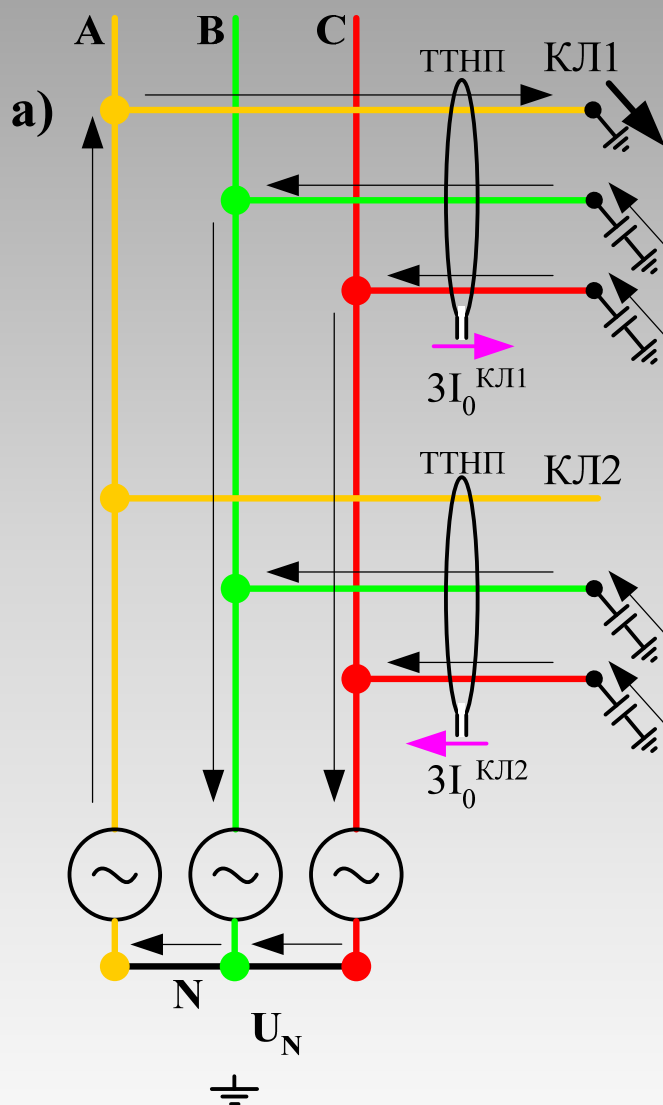


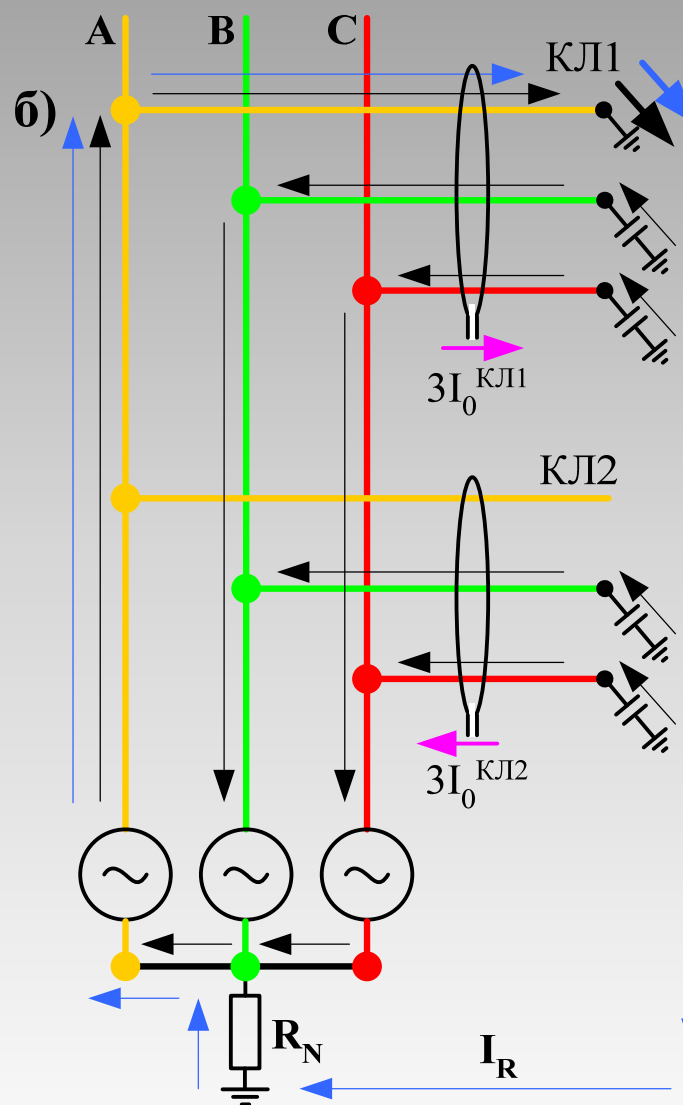
Работа релейной защиты в сетях 6-35 кВ

Дмитриев М.В.
www.mvdm.ru

Токи нулевой последовательности в сети 6-35 кВ



изолированная нейтраль



резистивно заземленная нейтраль

Ток замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью

Вычисление тока ОЗЗ через емкость:

$$I_{OЗЗ} = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot \omega \cdot C_{\Sigma M} = \sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \omega \cdot C_{\Sigma M}$$

$$C_{\Sigma M} = C^{КЛ1} + C^{КЛ2} + \dots$$

Вычисление тока ОЗЗ через ток «на фазу»:

$$I_{OЗЗ} = I_C^{КЛ1} + I_C^{КЛ2} + I_C^{КЛ3} + \dots$$

$$I_C^{КЛ1} = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot \omega \cdot C^{КЛ1} = 3 \cdot I_{C\Phi}^{КЛ1}$$

$$I_C^{КЛ2} = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot \omega \cdot C^{КЛ2} = 3 \cdot I_{C\Phi}^{КЛ2}$$

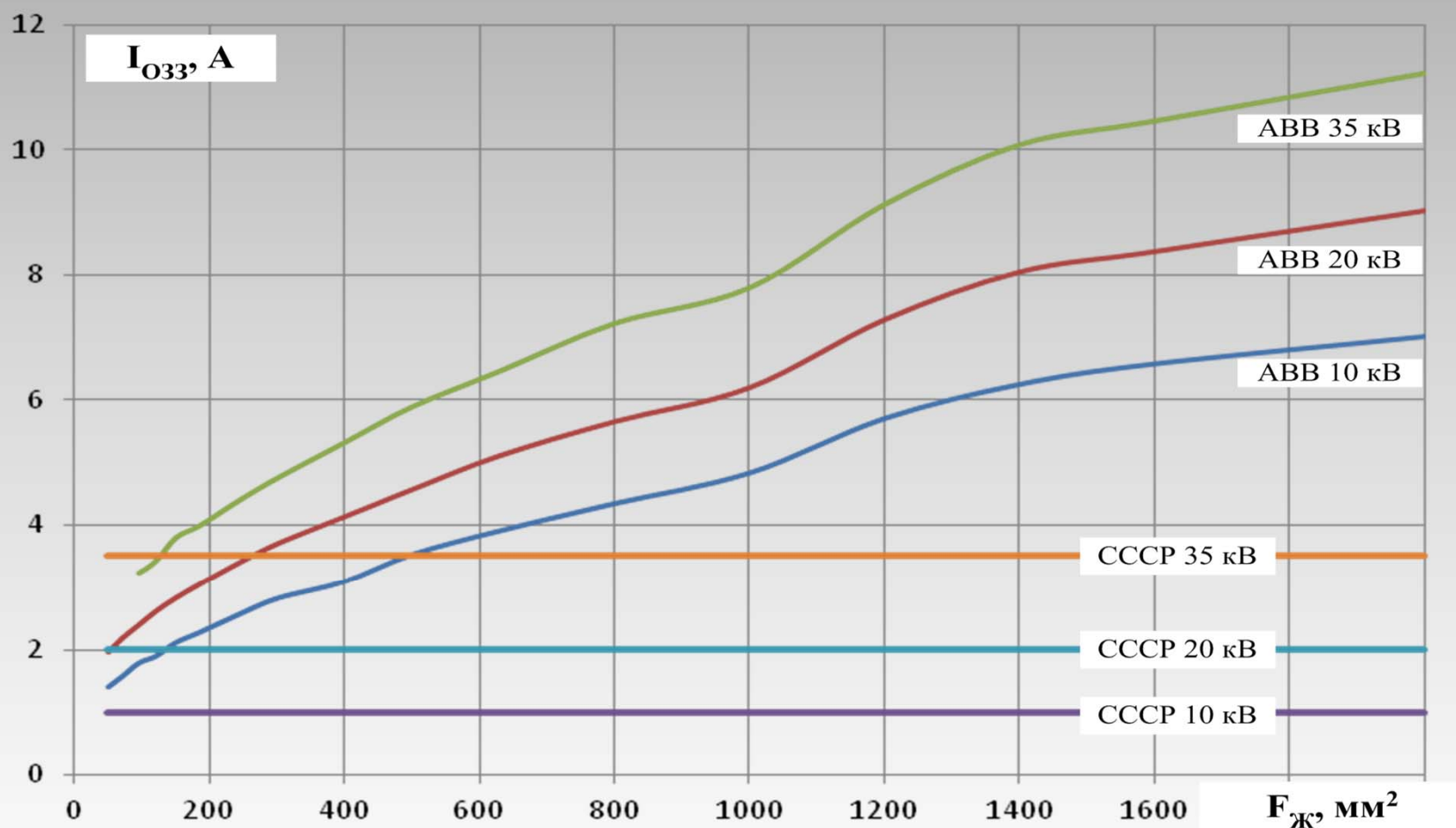
$$I_C^{КЛ3} = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot \omega \cdot C^{КЛ3} = 3 \cdot I_{C\Phi}^{КЛ3}$$

Емкость фазы и емкостный ток «на фазу»

Сечение жилы	Диаметр жилы	Толщина изоляции	Диаметр по изоляции	Сечение экрана	Наружный диаметр кабеля	Вес кабеля (Al жила)	Вес кабеля (Cu жила)	Емкость	Зарядный ток на фазу при 50 Гц	Индуктивность  		Волновое полное сопротивл.
мм ²	мм	мм	мм	мм ²	мм	кг/м	кг/м	мкФ/км	А/км	мГ/км	мГ/км	Ом
95	11.2	8.0	28.8	25	37.0	1.4	2.0	0.17	0.9	0.43	0.69	33.3
120	12.6	8.0	30.2	25	39.0	1.6	2.4	0.18	1.0	0.41	0.67	30.3
150	14.2	8.0	31.8	35	41.0	1.9	2.8	0.20	1.1	0.40	0.65	27.5
185	15.8	8.0	33.4	35	42.0	2.1	3.2	0.21	1.2	0.38	0.63	25.8
240	18.1	8.0	35.7	35	45.0	2.3	3.8	0.23	1.3	0.37	0.60	23.1
300	20.4	8.0	38.0	35	48.0	2.6	4.5	0.25	1.4	0.36	0.59	21.2
400	23.2	8.0	40.8	35	51.0	3.0	5.5	0.28	1.5	0.35	0.57	18.8
500	26.2	8.0	44.4	35	54.0	3.5	6.6	0.31	1.7	0.33	0.55	16.9
630	29.8	8.0	48.0	35	58.0	4.0	8.0	0.34	1.9	0.32	0.53	15.3
800	33.7	8.0	51.9	35	63.0	4.9	10.0	0.38	2.0	0.31	0.51	13.6
1000	37.9	8.0	56.1	35	67.0	5.7	12.1	0.41	2.2	0.30	0.49	12.4
1200	44	8.0	64.0	35	74.0	6.6	14.2	0.48	2.6	0.29	0.47	10.1
1400	49	8.0	69.0	35	81.0	7.4	16.2	0.53	2.9	0.29	0.46	10.0
1600	52	8.0	72.0	35	84.0	8.1	18.2	0.55	3.0	0.28	0.45	10.1
2000	56	8.0	76.0	35	88.0	9.6	22.3	0.59	3.2	0.28	0.44	9.2

Ток замыкания на землю и емкость кабеля 6-35 кВ

$$I_{OЗЗ} = \frac{U_{НОМ} \cdot l_{СУМ}}{10} \quad \text{- устаревшая формула!}$$



Емкость однофазных кабелей

Факторы, снижающие емкость:

- у СПЭ относительная диэлектрическая проницаемость 2.4 о.е., тогда как у БМИ проницаемость 4.2 о.е.

Факторы, увеличивающие емкость:

- У СПЭ-кабелей тоньше изоляция, чем у БМИ
- у однофазных СПЭ-кабелей сечение жилы до 2000 мм², тогда как у трехфазных не более 240 мм²

**Емкость современных кабелей в разы больше,
чем у предыдущего поколения кабелей!**

Ток нулевой последовательности $3I_0$ в сети с изолир. N

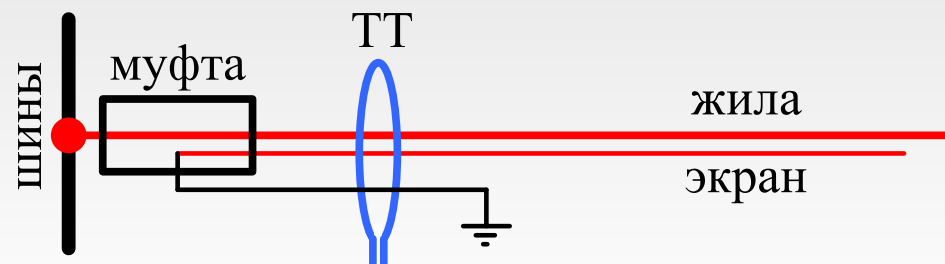
$$I_A + I_B + I_C = 3I_0$$

$$3I_0^{KL1} = I_{O33} - I_C^{KL1}$$

$$3I_0^{KL2} = -I_C^{KL2}$$

$$3I_0^{KL3} = -I_C^{KL3}$$

Схема подключения ТТ и ТТНП для исключения влияния токов в экранах:



Поиск места замыкания на землю

При замыкании на землю:

1. В нейтрали сети появляется напряжение 50 Гц
2. В линиях появляются токи нулевой последовательности $3I_0$, которые отличаются друг от друга
 - величиной
 - направлением

Поиск повреждения затруднен:

- если замыкание имеет дуговой характер
(величина и знак тока постоянно меняются, есть ВЧ-токи)

Поиск повреждения упрощен:

- если кабель трехфазный, а не однофазный
(надо подождать, и повреждение перейдет в К(2) или К(3))
- если нейтраль заземлена через резистор

Ток замыкания на землю в сети с резистивной нейтралью

2

$$I_{O33} = U_{\Phi} \cdot \sqrt{(3 \cdot \omega \cdot C_{\Sigma M})^2 + (1/R_N)^2}$$

Ток $3I_0$ вырос только в аварийной линии КЛ1:

$$3I_0^{KL1} = \sqrt{(I_{O33} - I_C^{KL1})^2 + I_R^2}$$

$$3I_0^{KL2} = -I_C^{KL2}$$

$$3I_0^{KL3} = -I_C^{KL3}$$

Работа защит стала проще!

Ток замыкания на землю в сети с компенсир. нейтралью

$$I_{O33} = U_{\Phi} \cdot \left(3 \cdot \omega \cdot C_{\Sigma M} - 1 / (\omega L_N) \right)$$

$$I_{O33} \approx 0$$

Ток $3I_0$ стали одного знака, работа РЗА усложнилась:

$$3I_0^{KL1} = I_{O33} - I_C^{KL1} = -I_C^{KL1}$$

$$3I_0^{KL2} = -I_C^{KL2}$$

$$3I_0^{KL3} = -I_C^{KL3}$$

Работа защит стала сложнее!

Особенности сети с компенсированной нейтралью

Реактор в нейтрали сети:

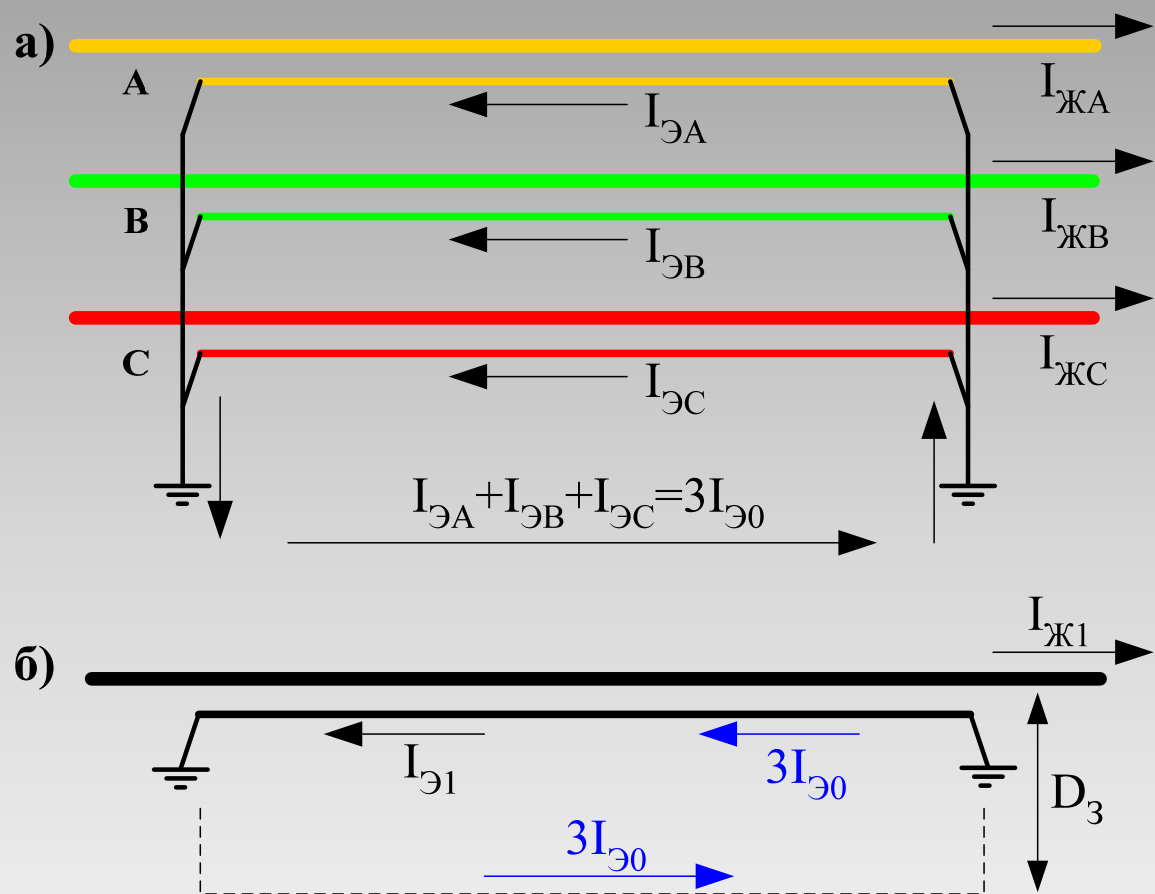
- не всегда корректно настраивается в резонанс с сетью
- не компенсирует токов высших гармоник 150 Гц и т.п.
- не упрощает работу защит (в отличие от резистора)

В кабельных сетях все чаще отказываются от реакторов, даже в нарушение ПУЭ, которые требует ограничить ток замыкания на уровне не более 30, 20, 10 А для сетей 6, 10, 35 кВ!

Заключение по емкостным токам ЗИО

- У кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена рабочая емкость «фаза-земля» больше, чем у кабелей с бумажно-масляной изоляцией.
- В сетях, построенных однофазными или трехфазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена, имеющими медные экраны, подключение измерительных трансформаторов тока всегда должно обеспечивать отсутствие влияния токов в экранах на результаты измерений.
- Массовое применение однофазных кабелей целесообразно проводить лишь в тех сетях, где обеспечено быстрое выявление и отключение однофазного замыкания на землю – как правило, для достижения этого приходится заземлять нейтраль сети через низкоомный резистор.
- В сетях, где возможна длительная работа с однофазным замыканием на землю, рекомендуется ограничить использование однофазных кабелей, применяя вместо них трехфазные кабели или с изоляцией из сшитого полиэтилена, или с бумажно-масляной.

Индуктированные токи $3I_0$ одноцепных КЛ



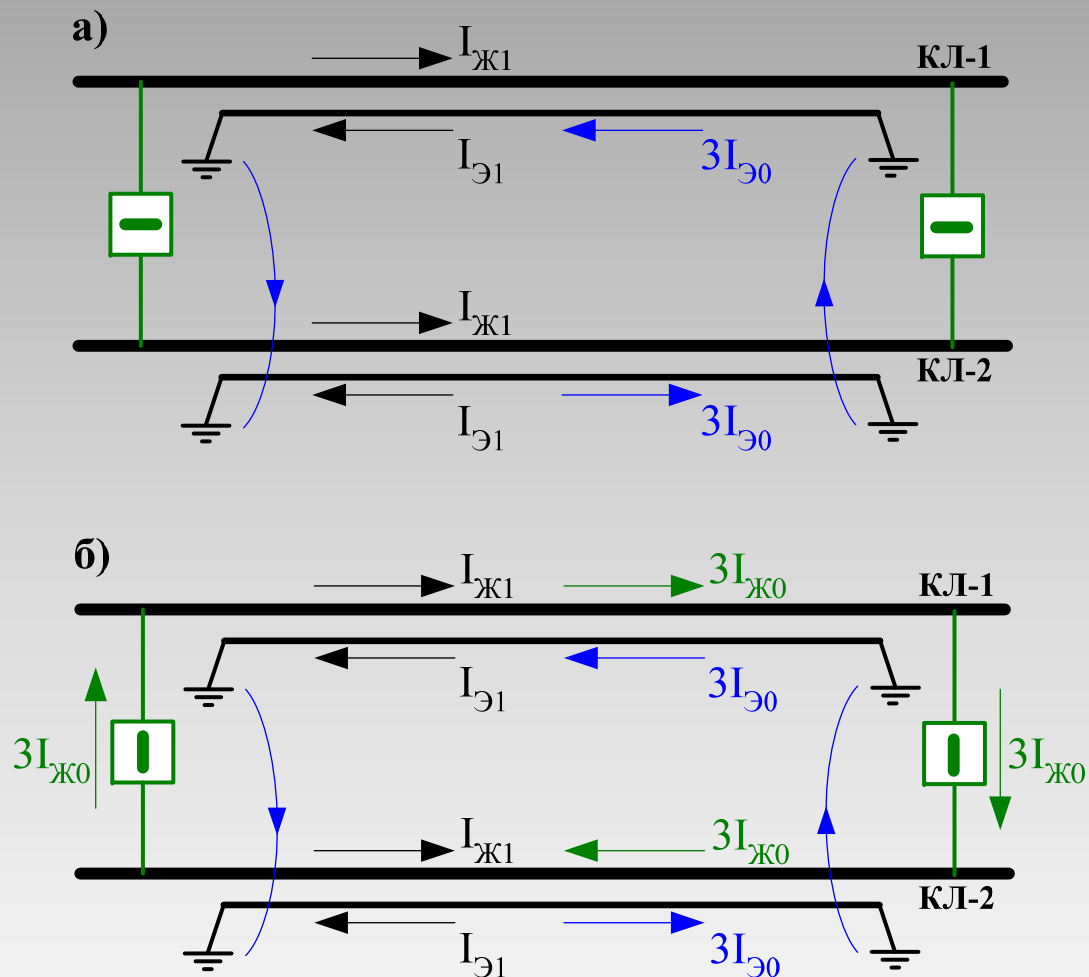
Токи прямой и нулевой последовательности в одноцепной КЛ:
 (а) – фазные токи; (б) – токи последовательностей.

Пример 3I0 для одноцепной КЛ

Индуктированные токи нулевой последовательности
в экранах одноцепной КЛ 10 кВ 500/95 мм²

Взаимное расположение	Dз, м			
	1127 м	100 м	10 м	1 м
	3I0э / Iж, о.е.			
Треугольник	0	0	0	0
Ряд, $s_{AB}=0.1$ м	0.021	0.027	0.038	0.062
Ряд, $s_{AB}=0.2$ м	0.020	0.026	0.038	0.064
Ряд, $s_{AB}=0.3$ м	0.019	0.026	0.038	0.064

Индуктированные токи $3I_0$ двухцепных КЛ



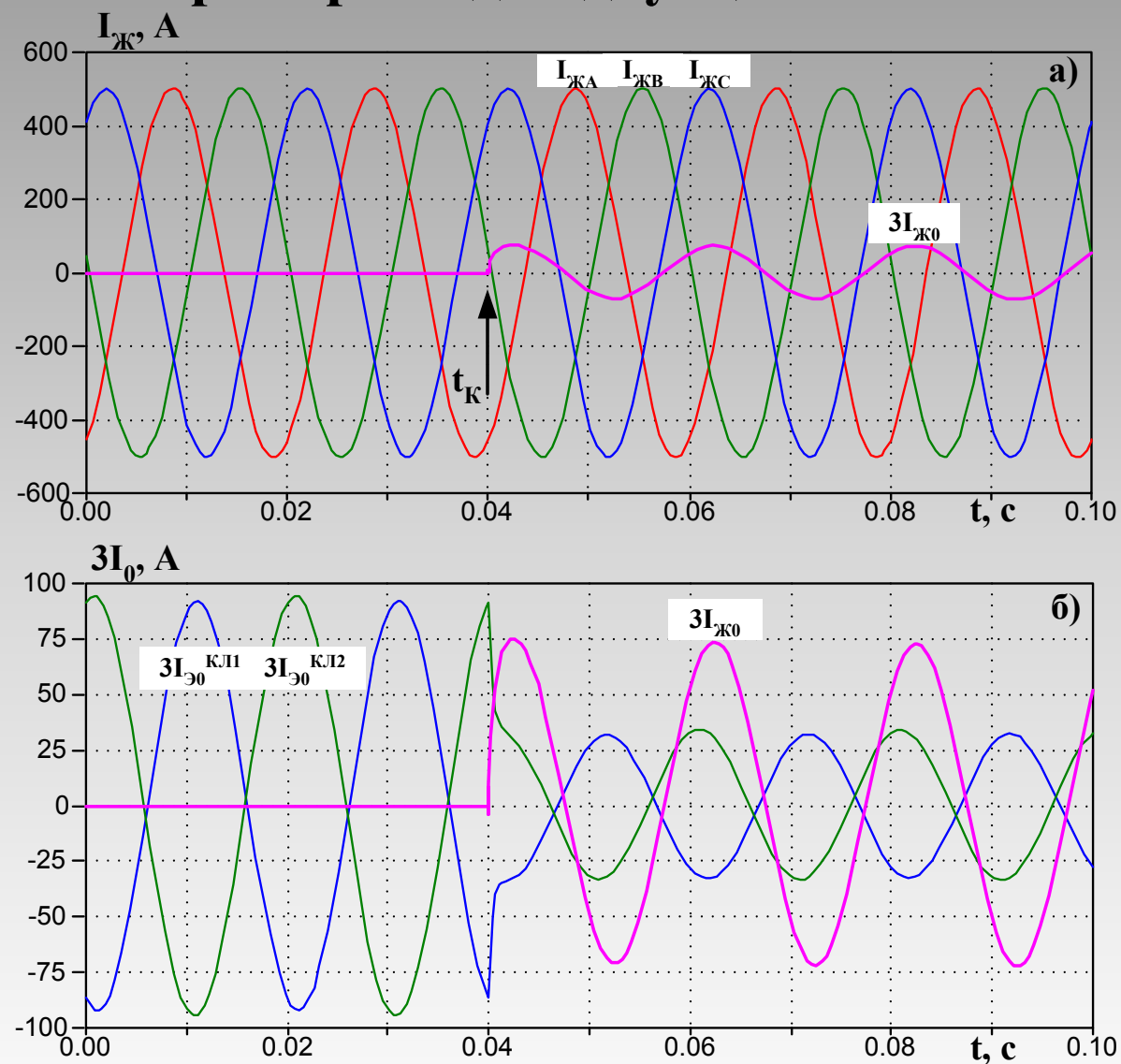
Токи прямой и нулевой последовательности в двухцепной КЛ:
 (а) – при разомкнутых выключателях; (б) – при замкнутых

Пример 3I0 для двухцепной КЛ

Индуктированные токи нулевой последовательности
в экранах двухцепной КЛ 10 кВ 500/95 мм²

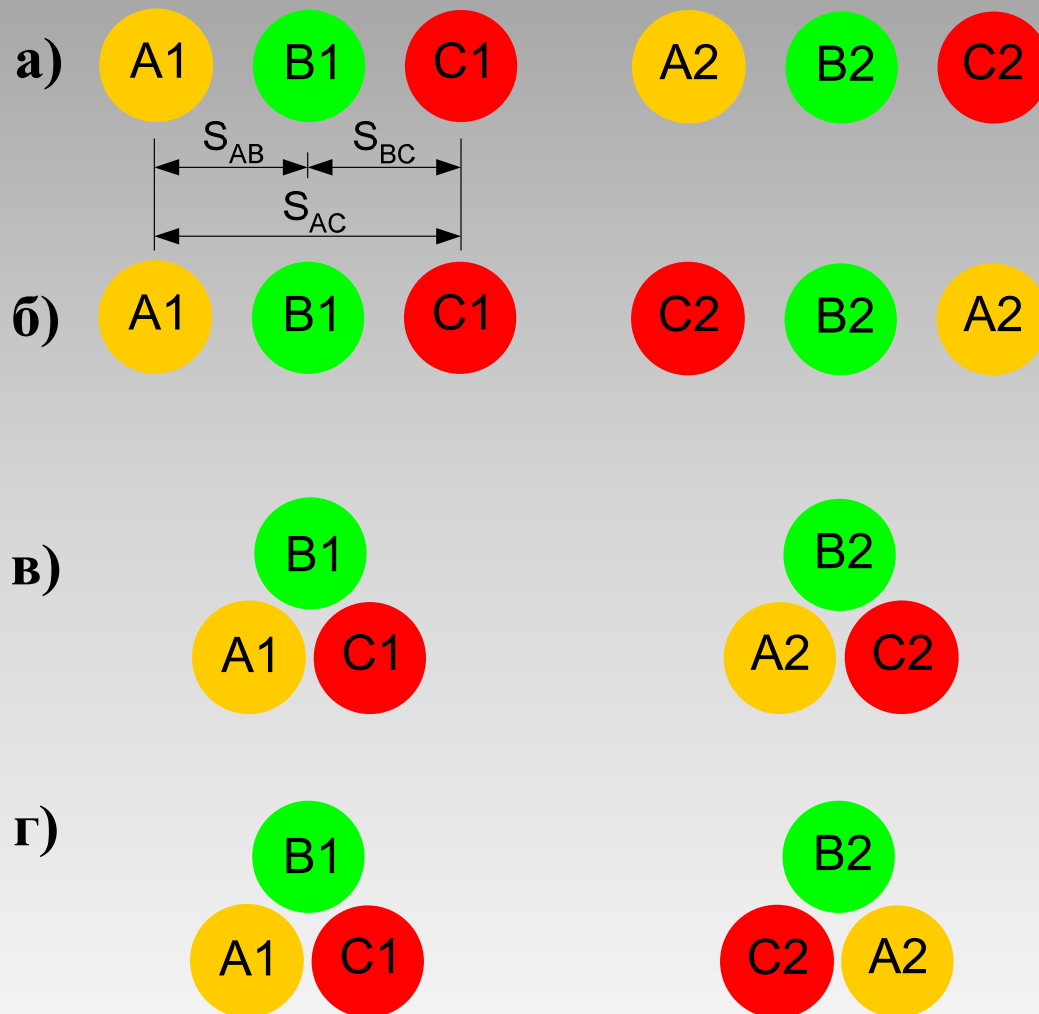
Взаимное расположение	Вариант раскладки фазных кабелей			
	Рис. А ABC-ABC	Рис. Б ABC-CBA	Рис. В ABC-ABC	Рис. Г ABC-CBA
	3I0э / Iж, о.е.			
Треугольник	-	-	0.011	0.002
Ряд, $s_{AB}=0.1$ м	0.049	0.014	-	-
Ряд, $s_{AB}=0.2$ м	0.106	0.018	-	-
Ряд, $s_{AB}=0.3$ м	0.183	0.024	-	-

Пример 3I0 для двухцепной КЛ



Осциллограммы токов для двухцепной кабельной линии ABC-ABC 17

Индуктированные токи $3I_0$ двухцепных КЛ



Основные способы раскладки фаз двухцепной КЛ:
 (а), (б) – рядная; (в), (г) – сомкнутый треугольник.

Заключение по индуктированным токам 3I0

- Прокладка однофазных кабелей сомкнутым треугольником имеет ряд важных преимуществ перед прокладкой в ряд, и одно из них – минимизация возможных проблем с токами нулевой последовательности в экранах и жилах.
- Если прокладку однофазных кабелей предполагается выполнить в ряд, то следует уделять особое внимание взаимному расположению кабелей, склоняясь к такому варианту, который обеспечит минимальные токи нулевой последовательности в экранах и жилах.
- Там, где это возможно, вместо однофазных кабелей целесообразно использовать трехфазные кабели.
- Подключение измерительных трансформаторов тока всегда должно обеспечивать отсутствие влияния токов в экранах кабелей на результаты измерений.

Спасибо за внимание!