

Сочи, 30 мая – 01 июня

Международная научно-техническая конференция

**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА
И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ – 2023**

 инженерный центр
энергосервис



**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ СВИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, МОНИТОРИНГА, РЕЛЕЙНОЙ
ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ**

Мокеев Алексей Владимирович

Мокеев А.В., Пискунов С.А.

ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет

Россия

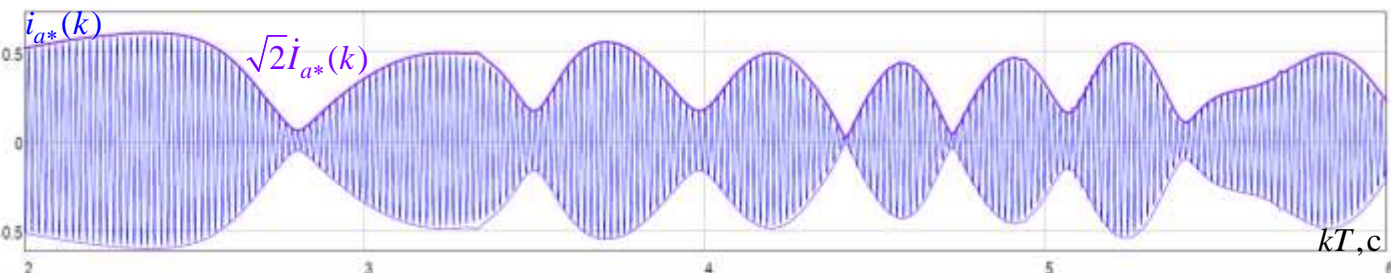
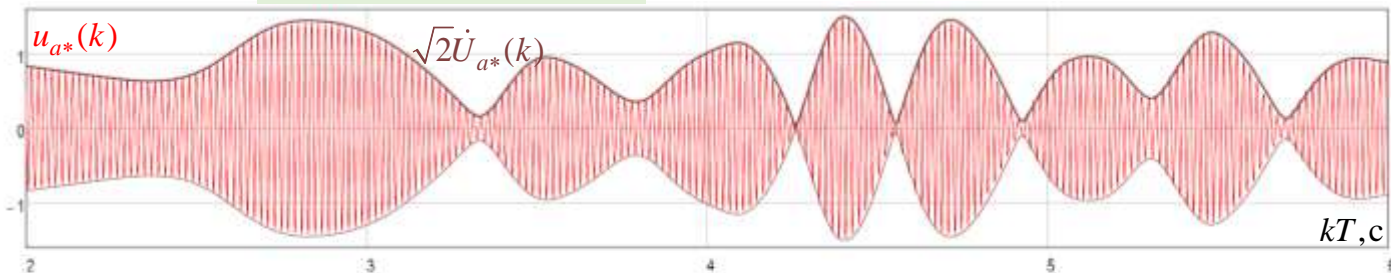
ПРЕИМУЩЕСТВА СИНХРОВЕКТОРОВ



Синхровектор напряжения и мгновенная частота

$$\dot{U}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m(t) e^{j\varphi(t)}$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{d\varphi(t)}{dt}$$



Развитие теории СВИ позволит повысить техническое совершенство систем *релейной защиты, автоматики, мониторинга и управления* и позволит приступить к реализации распределенных систем WAMPACS.

Актуальными являются задачи, связанные с определением *синхровекторов электромеханических и электромагнитных переходных* процессов. Их исследование позволяет разработать новые алгоритмы релейной защиты, автоматики, мониторинга и управления.

Требования к устройствам РЗА с поддержкой СВИ:

- повышения быстродействия и снижение требований по точности обработки сигналов;
- расширение диапазона измерений синхровекторов тока и напряжения;
- обеспечение правильной работы РЗА в условиях электромагнитных переходных процессов;
- повышение темпа передачи синхровекторов;
- внесение изменений в протокол IEEE C37.118.2 или передача синхровекторов с использованием протокола IEC 61850-9-2;
- обеспечение надежной синхронизации устройств РЗА;
- разработка новых тестов для испытаний устройств РЗА с поддержкой СВИ.

- точная оценка синхровекторов тока и напряжения при электромеханических переходных процессах в энергосистеме;
- высокая точность синхронизации времени (1 мкс);
- высокий темп передачи данных (≥ 50 раз/сек);
- расчет около 100 параметров режима энергосистемы на любом уровне управления;
- расчет параметров режима с учетом высших гармоник при использовании эквивалентных синхровекторов;
- оценка параметров схемы замещения энергосистемы.

СИНХРОВЕКТОРЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ



Определения синхровекторов тока $\dot{I}_1(t)$ и напряжения $\dot{U}_1(t)$ при трехфазном металлическом КЗ при заданном синхровекторе ЭДС $\dot{E}_1(t)$.

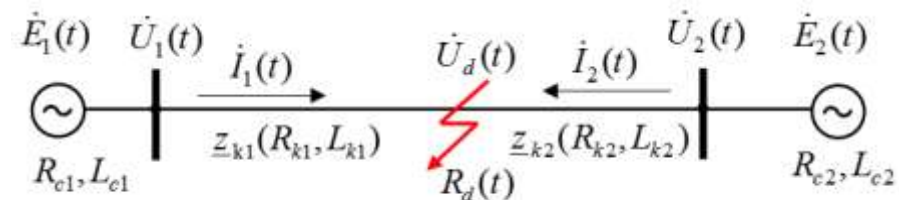


Рис. 1 а): Модель энергосистемы

№	Метод	Выражения
1	Декомпозиция ЭДС	$e_1(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{E}}_1^T e^{pt}), \dot{\mathbf{E}}_1 = [\dot{E}_n]_N = [E_{m_n} e^{-j\varphi_n}]_N, \mathbf{p} = [-\beta_n + j\omega_n]_N$ $\dot{\mathbf{I}}_1(t) = \dot{\mathbf{E}}_1 \circ Y(\mathbf{p}, t), \dot{\mathbf{I}}_{1s} = \dot{\mathbf{E}} \circ Y_0(\mathbf{p}), \dot{\mathbf{I}}_{1f} = \dot{\mathbf{E}}_1 \circ Y_1(\mathbf{p}, t),$ <p>где $Y(p, t) = \int_0^t g(\tau) e^{-p\tau} d\tau, Y(p, t) = Y_0(p) + Y_1(p, t),$</p> $\circ - \text{ операция умножения векторов, } g(t) \Leftrightarrow Y_0(p) = \frac{1}{R_{\Sigma 1} + pL_{\Sigma 1}}$
2	Частотной-временной подход	$\dot{I}_1(t) = \int_0^t \dot{E}_1(\tau) dY(j\omega_0, t - \tau) \text{ или}$ $\dot{I}_1(t) = \dot{E}_1(t) Y_0(j\omega_0) + \int_0^t Y_1(j\omega_0, \tau) d\dot{E}_1(t - \tau) + \dot{E}_1(0) Y_1(j\omega_0, t)$
3	Упрощенный частотно-временной подход	$\dot{I}_1(t) \approx \dot{E}_1(t) Y(j\omega(t), t), \dot{I}_{1s}(t) \approx \dot{E}(t) Y(j\omega(t)), \dot{I}_{1f}(t) \approx \dot{E}_1(0) Y_1(j\omega(t), t)$ <p>где $\omega(t)$ - мгновенная частота, рассчитываемая на основе $\dot{E}_1(t)$</p>
4	Решение дифференциального уравнения	$\dot{I}_1(t) = L^{-1} \int_0^t \dot{E}_1(\tau) e^{p_1(t-\tau)} d\tau, U_1(t) = z_{k1} \dot{I}_1(t) + L_{k1} \frac{d\dot{I}_1(t)}{dt}$ <p>где $p_1 = \beta_1 + j\omega_0, \beta_1 = R_{\Sigma 1} / L_{\Sigma 1}, \omega_0 = 2\pi 50 \text{ рад/с}$</p>
5	На основе интеграла свертки	$\dot{I}(t) = L^{-1} \int_0^t \dot{E}_1(t - \tau) e^{-p_1\tau} d\tau$

Табл. 1: Методы анализа переходных процессов

СИНХРОВЕКТОРЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ



Дифференциальное уравнение при металлическом КЗ на линии

$$e_1(t) = i_1(t)R_{\Sigma 1} + L_{\Sigma 1} \frac{di_1(t)}{dt}$$

где $R_{\Sigma 1} = R_{c1} + R_{k1}$, $L_{\Sigma 1} = L_{c1} + L_{k1}$.

Постановка $i_1(t) \rightarrow \dot{I}_1(t)e^{j\omega_0 t}$, $e_1(t) \rightarrow \dot{E}_1(t)e^{j\omega_0 t}$

$$\dot{E}_1(t) = \underline{z}_{\Sigma 1} \dot{I}_1(t) + L_{\Sigma 1} \frac{d\dot{I}_1(t)}{dt}$$

где $\underline{z}_{\Sigma 1} = R_{\Sigma 1} + j\omega_0 L_{\Sigma 1}$.

Определения синхровектора тока (п.4, табл.1)

$$\dot{I}_1(t) = L^{-1} \int_0^t \dot{E}_1(\tau) e^{p_1(t-\tau)} d\tau = L^{-1} F(t, t) - L^{-1} F(t, 0)$$

где $F(t, \tau)$ – первообразная интеграла.

$L^{-1} F(t, t)$ определяет принужденную, а $L^{-1} F(t, 0)$ свободную составляющую полного синхровектора тока.

Мгновенный ток переходного процесса

$$i_1(t) = \text{Re}(\dot{I}_1(t)e^{j\omega_0 t}).$$

Анализ электромагнитного переходного процесса при $\dot{E}_1(t) = \dot{E} = E_m e^{j\varphi}$.

Множитель $1/\sqrt{2}$ здесь и далее исключен из выражений для синхровекторов для наглядности построения графиков.

№	Наименование	Выражение
1	Решение ДУ	$\dot{I}(t) = L^{-1} \int_0^t \dot{E}(\tau) e^{-p_1(t-\tau)} d\tau = L^{-1} \dot{E} \int_0^t e^{-p_1(t-\tau)} d\tau$
2	Определение первообразной	$F(t, \tau) = \int e^{-p_1(t-\tau)} d\tau = \frac{e^{p_1(t-\tau)}}{p_1}$
3	Принужденная составляющая	$\dot{I}_{1s} = \frac{\dot{E} \cdot F(t, t)}{L} = \frac{\dot{E}}{p_1 L} = \frac{\dot{E}}{\underline{z}_{\Sigma 1}}$, $i_{1s}(t) = \text{Re}(\dot{I}_{1s} e^{j\omega_0 t})$
4	Свободная составляющая	$\dot{I}_{1f}(t) = \frac{\dot{E} \cdot F(t, 0)}{L} = -\frac{\dot{E}}{\underline{z}_{\Sigma 1}} e^{-p_1 t}$, $i_{1f}(t) = \text{Re}(\dot{I}_{1f}(t) e^{j\omega_0 t}) = -\text{Re}\left(\frac{\dot{E}}{\underline{z}_{\Sigma 1}}\right) e^{-\beta_1 t}$

Табл. 2: Пример расчета полного синхровектора тока и его компонент

СИНХРОВЕКТОРЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

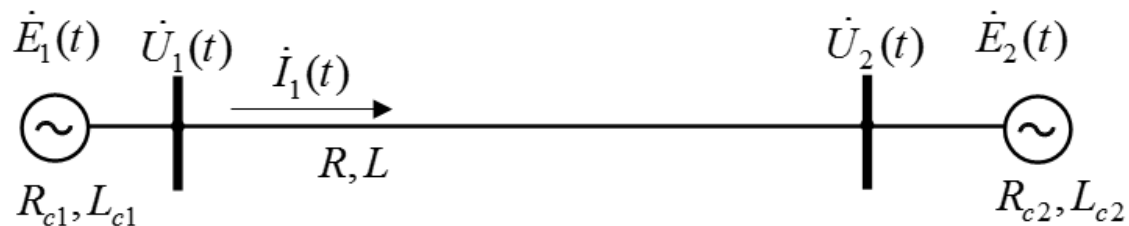


Рис. 1 б): Модель энергосистемы

Расчет синхровекторов тока и напряжения.

Заданы $\dot{E}_1(t)$ и $\dot{E}_2(t)$.

Требуется определить синхровектор тока в линии $\dot{I}_1(t)$ и синхровекторы напряжений $\dot{U}_1(t)$ и $\dot{U}_2(t)$.

Необходимо сделать следующие замены в табл.1:

вместо $\dot{E}_1(t)$ необходимо использовать

$$\Delta \dot{E}(t) = \dot{E}_1(t) - \dot{E}_2(t)$$

и сделать замены в выражениях для сопротивлений.

Идентификация параметров линии

Известны $\dot{I}_1(t)$, $\dot{U}_1(t)$ и $\dot{U}_2(t)$.

Требуется выполнить оценку параметров линии.

После преобразования диф. уравнения получим

$$\Delta \dot{U}(t) = \underline{z}_1 \dot{I}_1(t) + L_1 \frac{d\dot{I}_1(t)}{dt}$$

Оценка сопротивления

$$\underline{z}_1 = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + \underline{k}_1 \dot{I}'(t)}$$

$$\text{где } \dot{I}'(t) = \frac{d\dot{I}(t)}{dt}, \quad \underline{k}_1 = \frac{L_{\text{уд}}}{\underline{z}_{\text{уд}}}$$

Виртуальное УСВИ

Известны $\dot{I}_1(t)$, $\dot{U}_1(t)$, \underline{z}_1 .

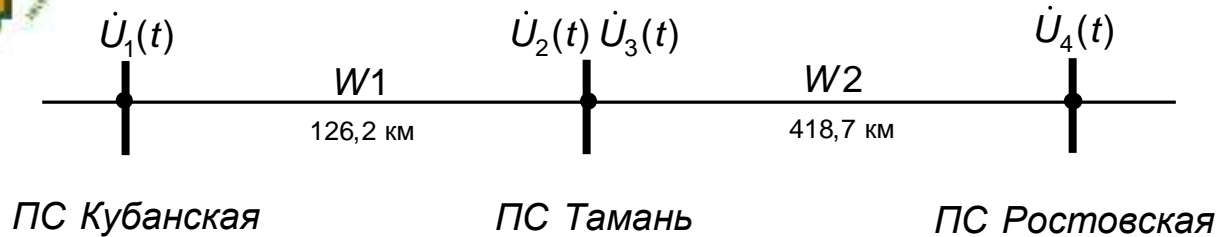
Требуется найти $\dot{U}_2(t)$.

$$\dot{U}_2(t) = \dot{U}_1(t) - \underline{z}_1 \dot{I}_1(t) - L_1 \frac{d\dot{I}_1(t)}{dt}$$

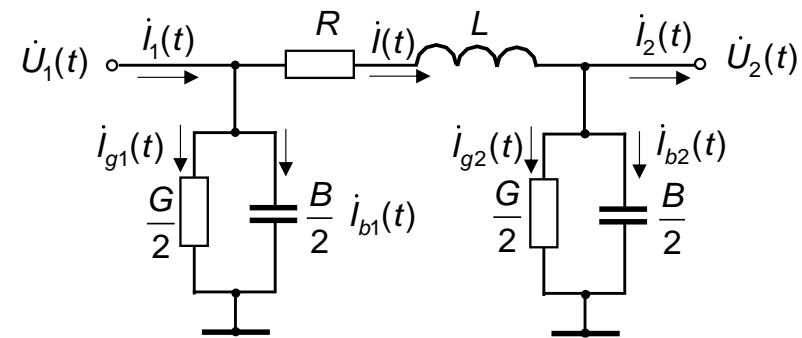
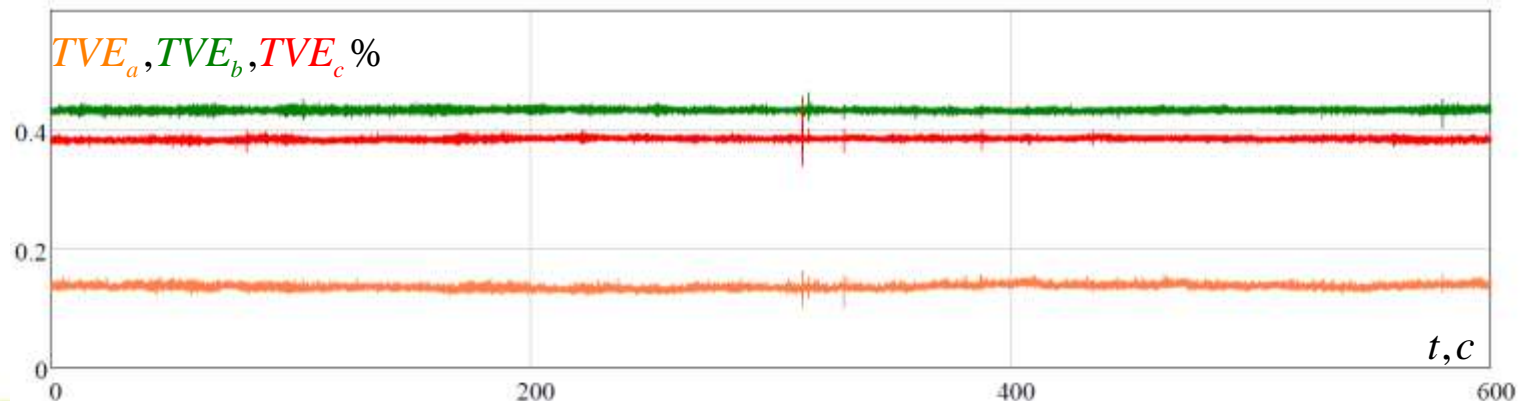
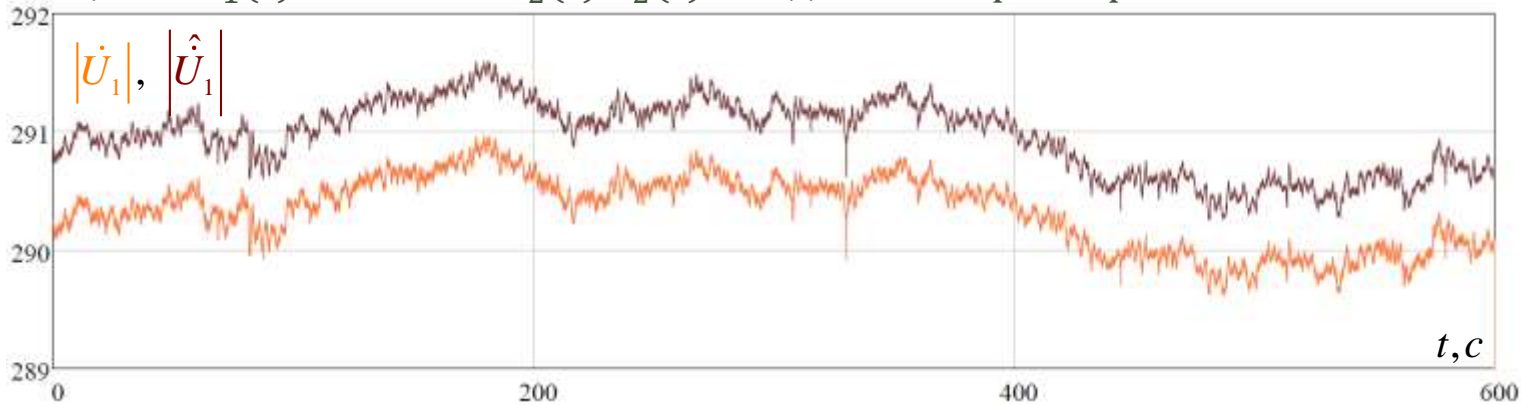
ВИРТУАЛЬНЫЙ УСВИ, ВЕРИФИКАЦИЯ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ



Транзит ПС Кубанская – ПС Тамань – ПС Ростовская



Оценка $\dot{U}_1(t)$ на основе $\dot{U}_2(t)$, $\dot{I}_2(t)$ и заданных параметрах линии W1



$$\dot{I}(t) = \dot{I}_2(t) + \dot{I}_{g2}(t) + \dot{I}_{b2}(t)$$

$$\dot{I}(t) = \dot{I}_2(t) + \frac{G}{2}\dot{U}_2(t) + j\frac{B}{2}\dot{U}_2(t) + \frac{B}{2\omega_0}\frac{d\dot{U}_2(t)}{dt}$$

$$\dot{U}_1(t) = \dot{U}_2(t) + \underline{z}\dot{I}(t) + L\frac{d\dot{I}(t)}{dt},$$

где $\underline{z} = R + j\omega_0 L$

$$\dot{I}(n) = \dot{I}_2(n) + \dot{I}_{g2}(n) + \dot{I}_{b2}(n)$$

$$\dot{I}(n) = \dot{I}_2(n) + \frac{G}{2}\dot{U}_2(n) + j\frac{B}{2}\dot{U}_2(n) + \frac{B}{2\omega_0}\nabla\dot{U}_2(n)$$

$$\dot{U}_1(n) = \dot{U}_2(n) + \underline{z}\dot{I}(n) + L\nabla\dot{I}(n)$$

ВИРТУАЛЬНЫЙ УСВИ



Поиск источника НЧК

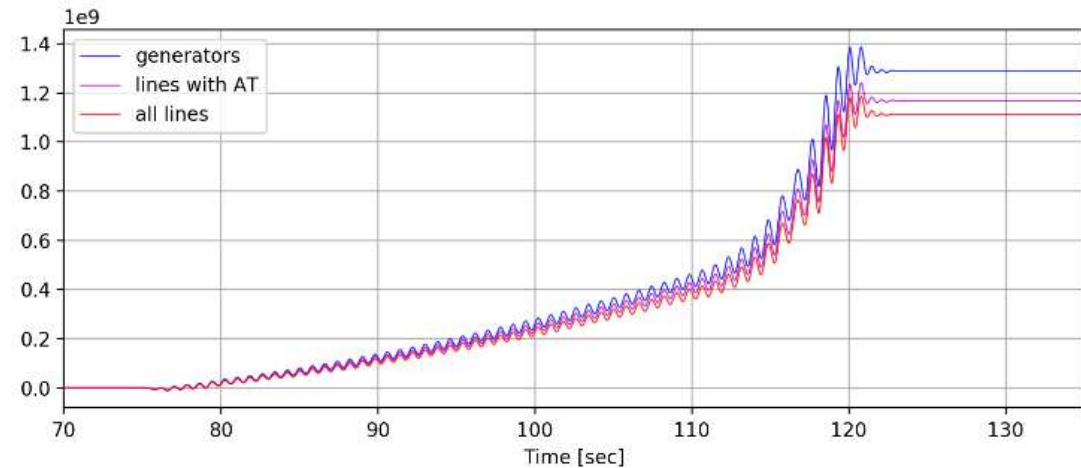
Popov I.A., Butin K.P., Dubinin D.M., Rodionov A.V., Mokeev A.V., Piskunov S.A. Examples of processing low-frequency oscillations in Russia and ways to improve the analysis // The 2022 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics – SG SMA, Split, Croatia, May 24h-26th 2022.

№	Метод	Выражения
1	Решение дифференциального уравнения	$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t \dot{E}(\tau) e^{\rho_1(t-\tau)} d\tau,$ где $\rho_1 = \beta + j\omega_0$, $\beta = (R_c + R) / (L_c + L)$, $\omega_0 = 2\pi 50$ рад/с, R_c, L_c – параметры эквивалентной энергосистемы.
2	На основе интеграла свертки	$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t \dot{E}(t-\tau) e^{-\rho_1 \tau} d\tau$
3	Частотной-временной подход	$i(t) = \int_0^t \dot{E}(\tau) dY(j\omega_0, t-\tau) = E(t)Y_0(j\omega_0) + \int_0^t Y_1(j\omega_0, \tau) d\dot{E}(t-\tau) + E(0)Y_1(j\omega_0, t)$ где $g(t) \leftrightarrow Y(p) = \frac{1}{R + pL}$, $Y(p, t) = \int_0^t g(\tau) e^{-p\tau} d\tau$, $Y(p, t) = Y_0(p) + Y_1(p, t)$
4	Упрощенный метод	$i(t) = \dot{E}(t)Y(j\omega(t), t), \dot{I}_1(t) = \dot{E}(t)Y(j\omega(t)), \dot{I}_2(t) = E(0)Y_1(j\omega(t), t)$ где $\omega(t)$ – мгновенная частота, рассчитываемая на основе $\dot{E}(t)$

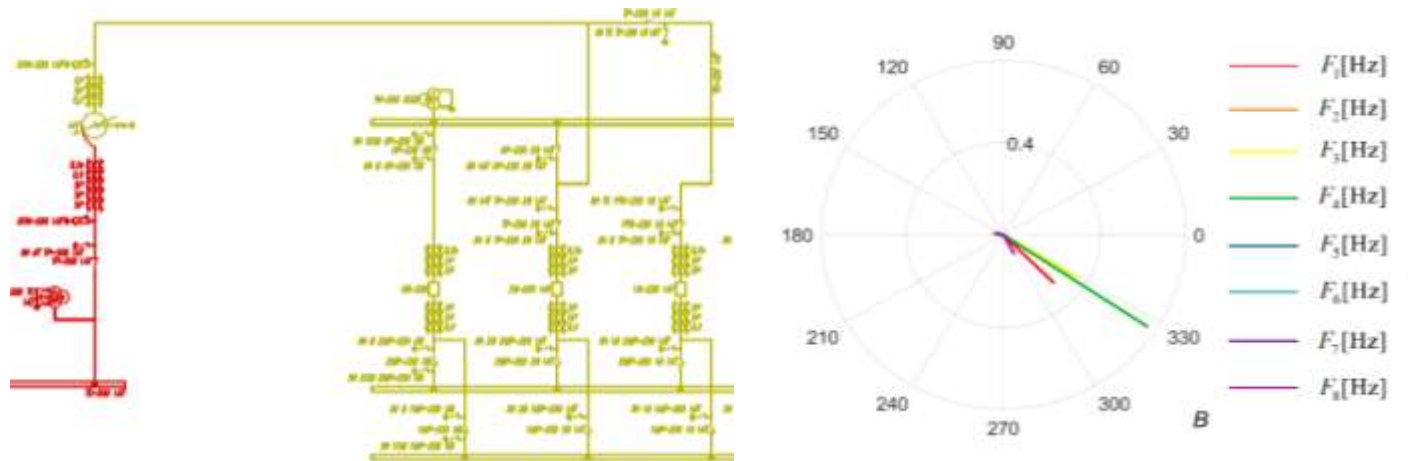


№	Метод	Выражения
1	Решение разностного уравнения	$i(n) = \frac{T}{L} \sum_{m=0}^n \Delta U(m) e^{\rho_1(n-m)T}$
2	На основе свертки	$i(n) = \frac{T}{L} \sum_{m=0}^n \Delta U(n-m) e^{-\rho_1 m T}$
3	Частотной-временной подход	$i(n) = \Delta U(n)Y_0(j\omega_0) + T \sum_{m=0}^n Y_1(j\omega_0, m) \Delta U'(n-m) + \Delta U(0)Y_1(j\omega_0, n)$
4	Упрощенный метод	$i(n) \approx \Delta U(n)Y(j\omega(n), nT), \dot{I}_1(n) \approx \Delta U(n)Y(j\omega(n)), \dot{I}_2(n) \approx \Delta U(0)Y_1(j\omega(n), nT)$

The Dissipating Energy Flow (DEF) method



Mode shape estimation (MSE)



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ



№	Наименование	Выражение
1	Дифференциальное уравнение линии	$u_1(t) = i_1(t)R_{к1} + L_{к1} \frac{di_1(t)}{dt}$
2	Оценка комплексного сопротивления	$\hat{z}_{\Sigma}(t) = \frac{\hat{U}(t)}{\hat{I}(t) + k\hat{I}'(t)}$, где $\hat{I}'(t) = \frac{d\hat{I}(t)}{dt}$, $\hat{z}_{\Sigma 1}(t) = \hat{z}_{к1} + R_d(t)$, $k = L_{\text{yn}}/z_{\text{yn}}$
3	Оценка параметров петли КЗ	$\hat{L}_{к1}(t) = \text{Im}(\hat{z}_{\Sigma}(t))$, $\hat{R}_{\Sigma 1}(t) = \text{Re}(\hat{z}_{\Sigma}(t))$
4	Оценка сопротивления дуги	$\hat{R}_d(t) = \hat{R}_{\Sigma 1}(t) - \hat{L}_{к1}(t) \frac{R_{\text{yn}}}{L_{\text{yn}}}$
5	Оценка активного сопротивления	$\hat{R}_{к1}(t) = \hat{R}_{\Sigma 1}(t) - \hat{R}_d(t)$

Табл. 3: Оценка комплексного сопротивления петли КЗ и его компонент

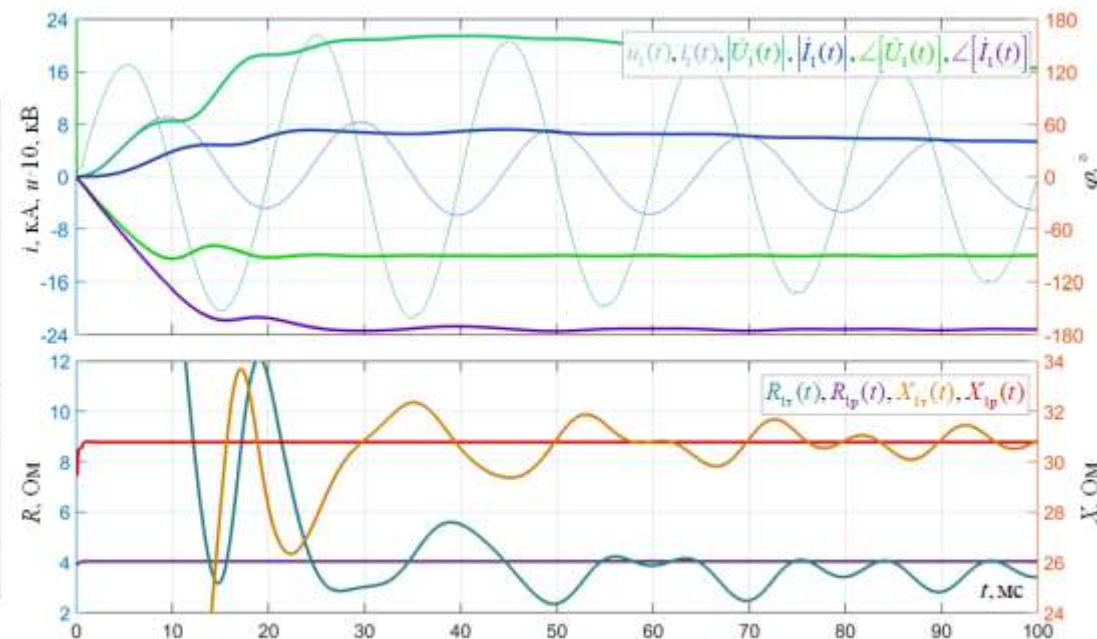


Рис. 2: Оценка R, X при одностороннем замере

Алгоритм дистанционной защиты линии 110-220 кВ на основе одностороннего измерения синхровекторов тока и напряжения при $\dot{E}_2(t) = 0$, при отсутствии подпитки места КЗ от потребителей с учетом компенсации влияния дуги





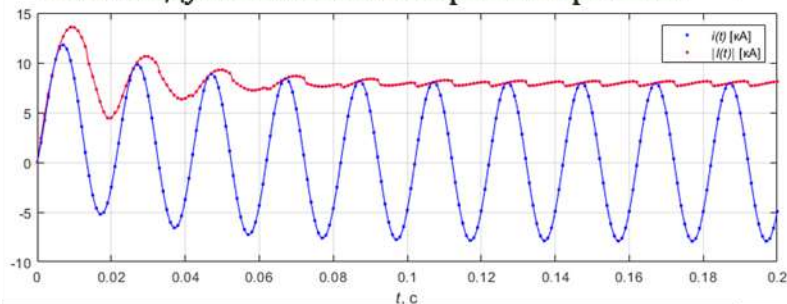
СИОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

$$\frac{dR_d(t)}{dt} = -\frac{R_d(t)}{\tau} \left(\frac{[\operatorname{Re}(i(t)e^{j\omega_0 t})]^2 R_d(t)}{P_0} - 1 \right)$$

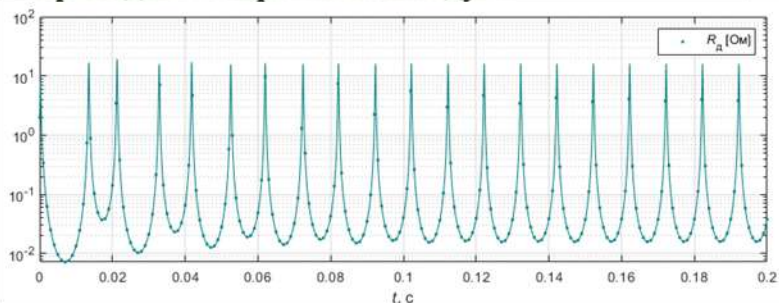
$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L_\Sigma} (\dot{E}(t) - (z_\Sigma + R_d(t))i(t))$$

$z_\Sigma = R_\Sigma + j\omega_0 L_\Sigma$, $R_\Sigma = R + R_c$,
 τ – постоянная времени дуги,
 P_0 – рассеиваемая мощность дуги

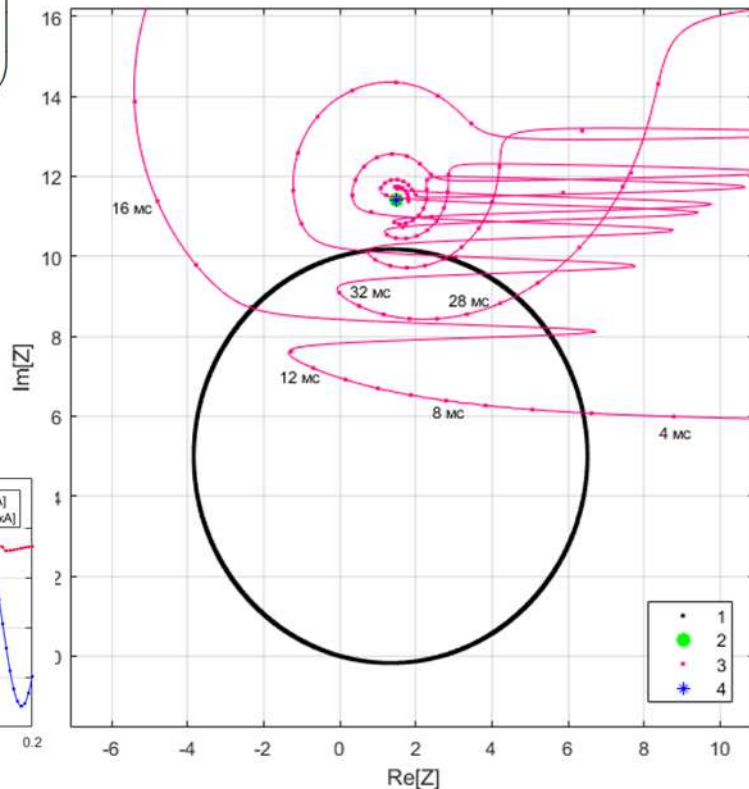
Ток и модуль полного синхровектора тока



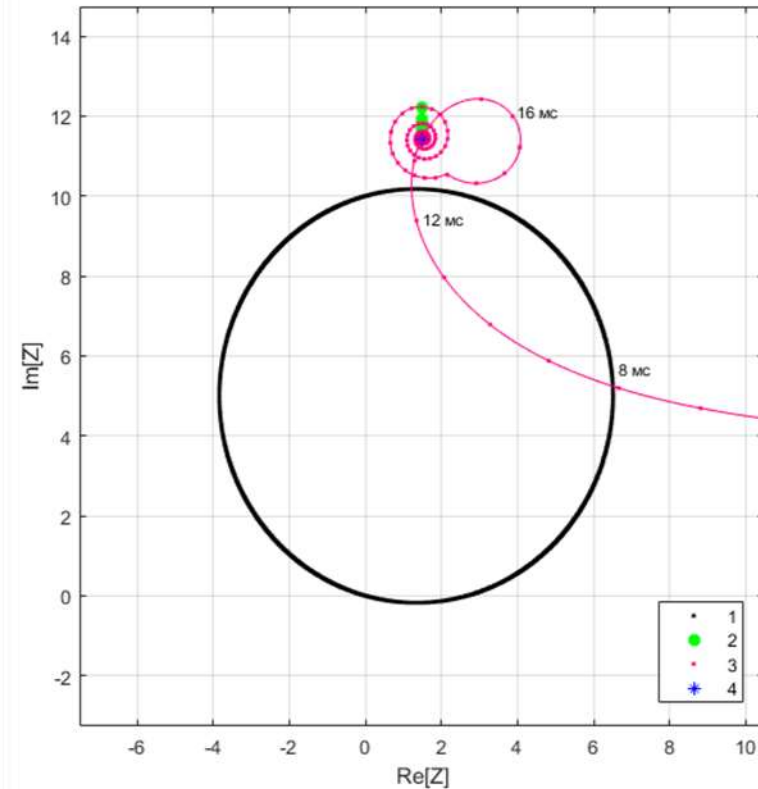
Переходное сопротивление дуги



сопротивление процесса



оценка сопротивления



- 1 характеристика срабатывания
- 2 традиционный алгоритм и АФ
- 3 предлагаемый алгоритм и АФ
- 4 истинное значение

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХСТОРОННИХ ИЗМЕРЕНИЙ



При $\dot{I}_1(t) \neq \dot{I}_2(t)$ оценка расстояния до точки КЗ и комплексного сопротивления петли КЗ со стороны первой энергосистемы

$$\hat{I}_k(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t) + \underline{z}_{\text{уд}} \dot{I}_2(t) + L_{\text{уд}} \dot{I}_2'(t)}{\underline{z}_{\text{уд}} \dot{I}(t) + L_{\text{уд}} \dot{I}'(t)}, \quad \hat{z}_1(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t) + \underline{z}_{\text{уд}} \dot{I}_2(t) + L_{\text{уд}} \dot{I}_2'(t)}{\dot{I}(t) + \underline{k}_1 \dot{I}'(t)},$$

где $\Delta \dot{U}(t) = \dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)$, $\dot{I}(t) = \dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t)$, $\dot{I}'(t) = \dot{I}_1'(t) + \dot{I}_2'(t)$.

При $\dot{I}_1(t) = \dot{I}_2(t) = \dot{I}(t)$ (нормальный режим или внешнее КЗ)

$$\hat{z}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + \underline{k}_1 \dot{I}'(t)}$$

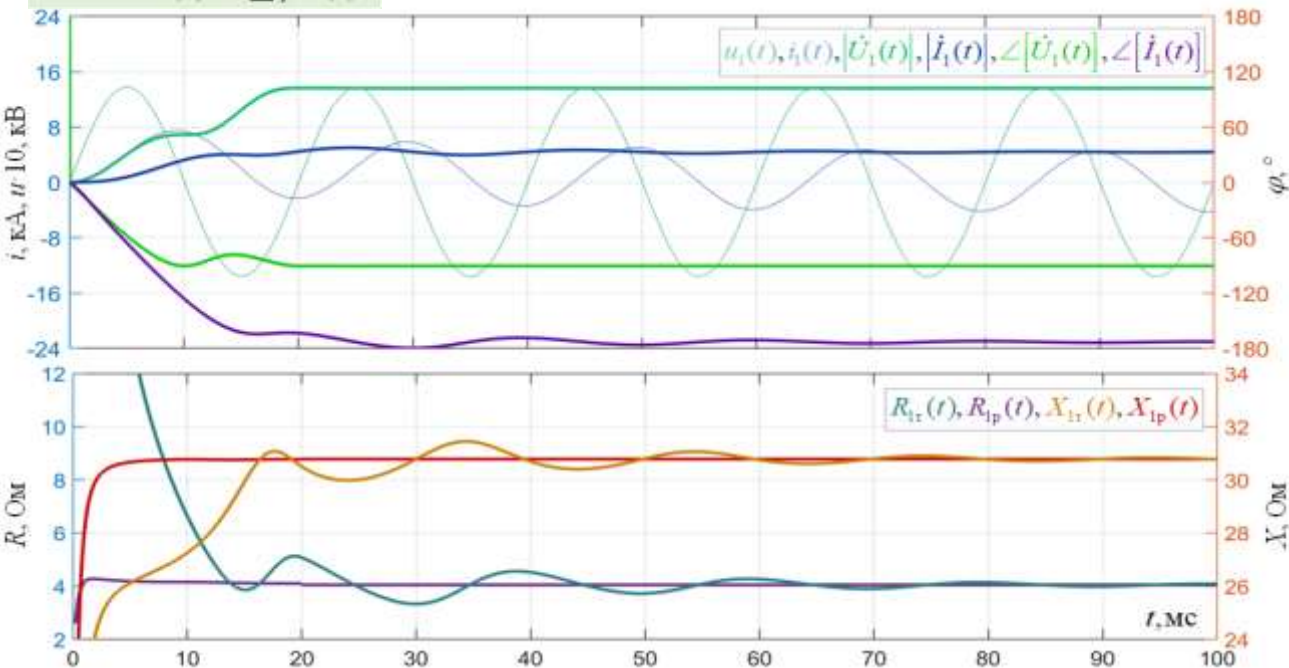


Рис. 3: Оценка R, X при двухстороннем замере

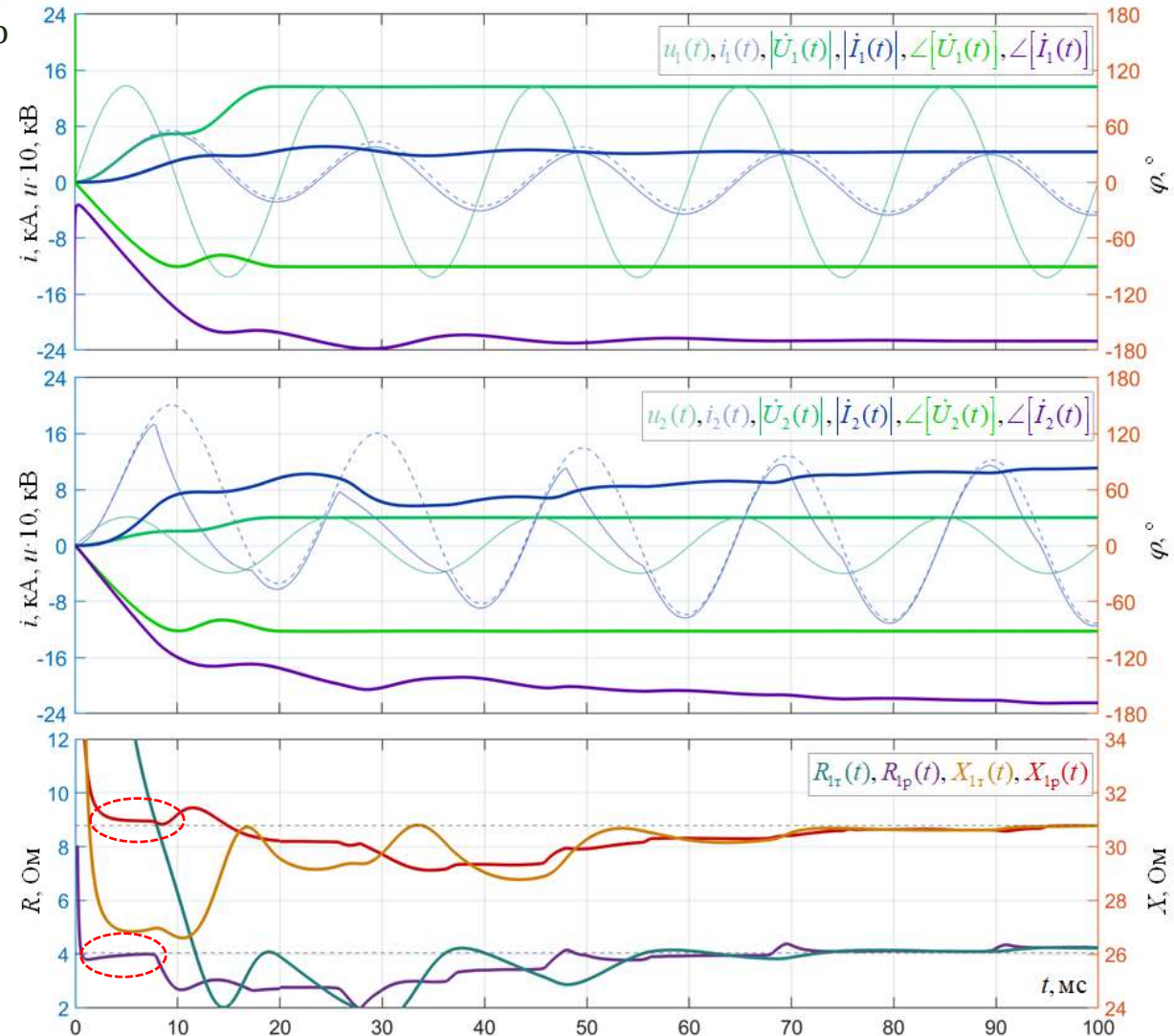


Рис. 4: Оценка R, X при двухстороннем замере при насыщении ИТТ

РАБОТА ДЗ В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ



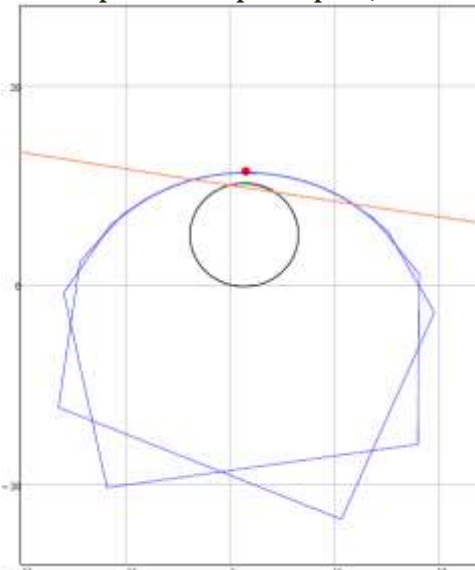
Традиционный алгоритм ДЗ

$$\hat{z}_{12}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t)} = z_{12} \frac{(\omega_0 + \Delta\omega)(\dot{E}e^{j\Delta\omega t} - \dot{E}_0)}{\omega_0 \dot{E}e^{j\Delta\omega t} - (\omega_0 + \Delta\omega)\dot{E}_0}$$

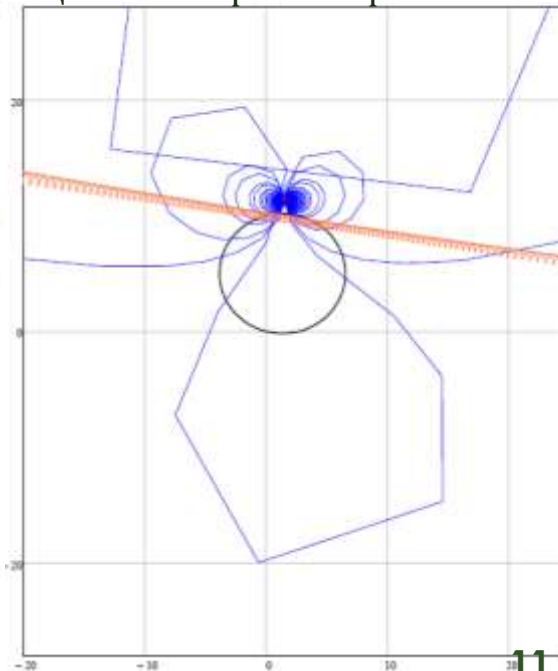
Предлагаемый алгоритм

$$\hat{z}_{12}(t) = \frac{\Delta \dot{U}(t)}{\dot{I}(t) + k\dot{I}'(t)} = z_{12}$$

синхровекторы процессов



оценка синхровекторов



традиционный

традиционный односторонний

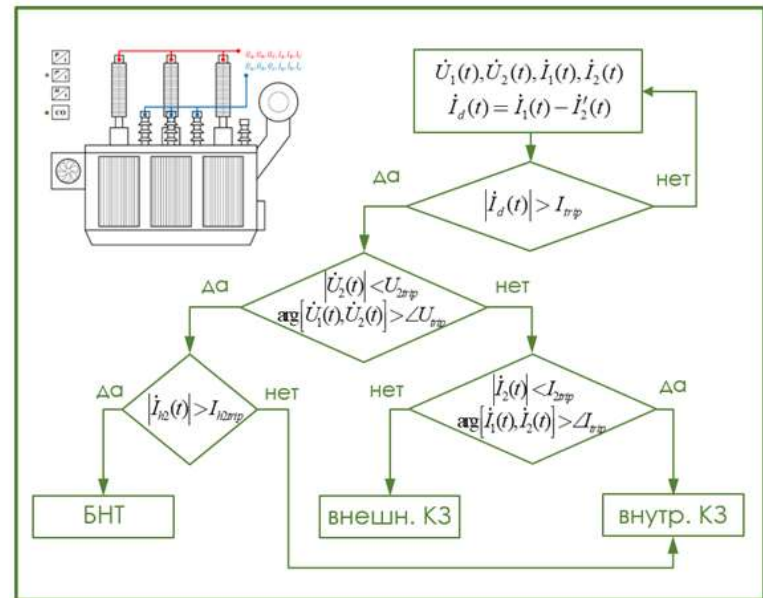
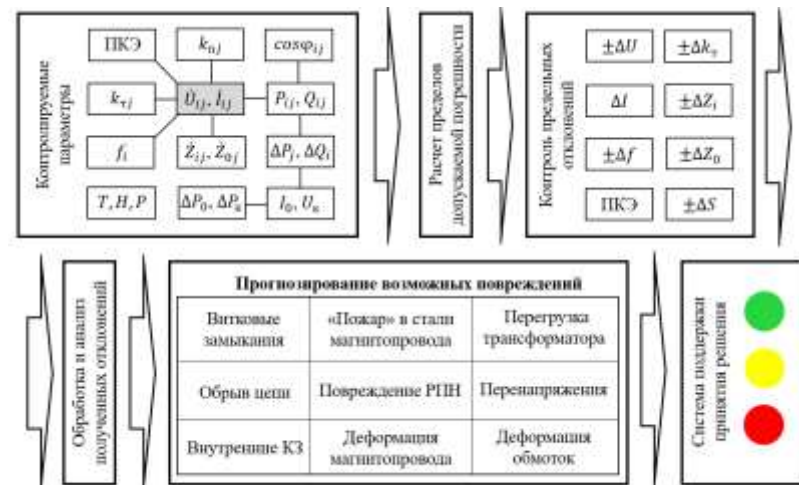
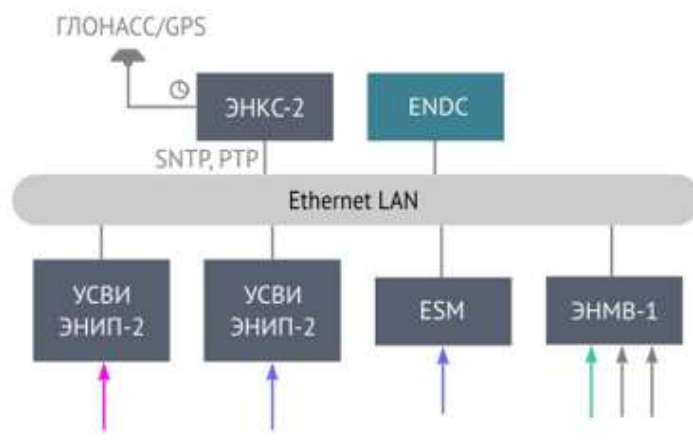
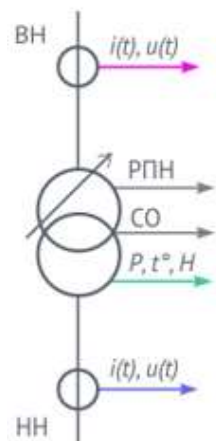
предлагаемый

№	Наименование	Выражение
1	Энергосистема	<p>236 кВ $\omega_1 = 2\pi \cdot 45$ рад/с $Z_{s1} = 12 + j12,8$ Ом</p> <p>231 кВ $\omega_0 = 2\pi \cdot 50$ рад/с $Z_{s0} = 0$</p>
2	ДУ	$\Delta e(t) = R_{03}i(t) + L_{03} \frac{di(t)}{dt}$
3	Синхровекторы	$\dot{E}_1(t) = \dot{E}e^{j\Delta\omega t}$, $\Delta \dot{E}(t) = \dot{E}_1(t) - \dot{E}_0$, $\Delta\omega = -2\pi \cdot 5$ рад/с
4	Подстанция в ДУ	$\Delta \dot{E}(t) = z_{03}\dot{I}(t) + L_{03} \frac{d\dot{I}(t)}{dt}$
5	Неоднородное ДУ	$\frac{d\dot{I}(t)}{dt} + p_{03}\dot{I}(t) = \frac{1}{L_{03}}\Delta \dot{E}(t)$, где $p_{03} = \beta_{03} + j\omega_0$, $\beta_{03} = \frac{R_{03}}{L_{03}}$
6	Синхровектор тока	$\dot{I}(t) = \frac{1}{L_{03}}e^{-p_{03}t} \int_0^t \Delta \dot{E}(\tau)e^{p_{03}\tau} d\tau$
7	Принужденная компонента $\dot{I}_p(t)$	$\dot{I}_p(t) = \frac{\dot{E}}{z_{\Delta 03}}e^{j\Delta\omega t} - \frac{\dot{E}_0}{z_{03}}$, где $z_{\Delta 03} = R_{03} + j(\omega + \Delta\omega)L_{03}$
8	Синхровектор напряжения $\dot{U}_{1p}(t)$	$\dot{U}_{1p}(t) = \dot{E}_1(t) - z_{01}\dot{I}_p(t) - L_{01} \frac{d\dot{I}_p(t)}{dt} = \left(1 - \frac{z_{01}}{z_{\Delta 03}} + \frac{j\Delta\omega L_{01}}{z_{\Delta 03}}\right)\dot{E}e^{j\Delta\omega t} + \frac{z_{01}}{z_{03}}\dot{E}_0$
9	Синхровектор напряжения $\dot{U}_{2p}(t)$	$\dot{U}_{2p}(t) = \dot{U}_{1p}(t) - z_{12}\dot{I}_p(t) - L_{12} \frac{d\dot{I}_p(t)}{dt} = \left(1 - \frac{z_{02}}{z_{\Delta 03}} + \frac{j\Delta\omega L_{02}}{z_{\Delta 03}}\right)\dot{E}e^{j\Delta\omega t} + \frac{z_{02}}{z_{03}}\dot{E}_0$
10	Разность синхровекторов напряжений	$\Delta \dot{U}_p(t) = \dot{U}_{1p}(t) - \dot{U}_{2p}(t) = \left(\frac{z_{12}}{z_{\Delta 03}} + \frac{j\Delta\omega L_{12}}{z_{\Delta 03}}\right)\dot{E}e^{j\Delta\omega t} + \frac{z_{12}}{z_{03}}\dot{E}_0$

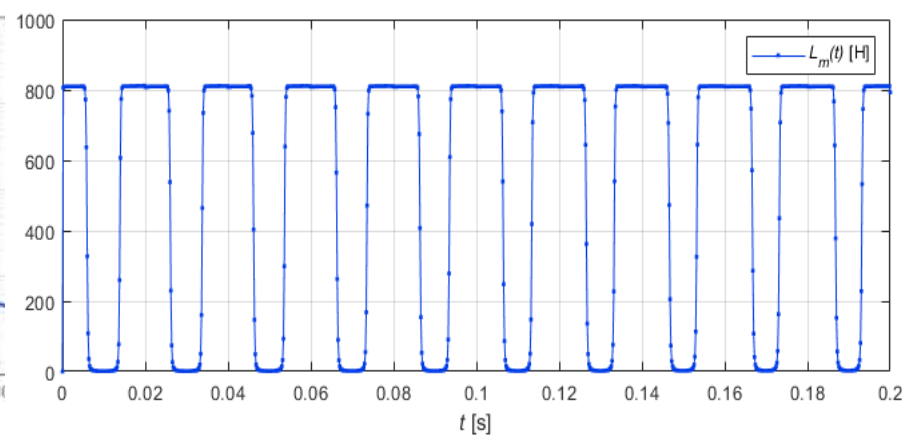
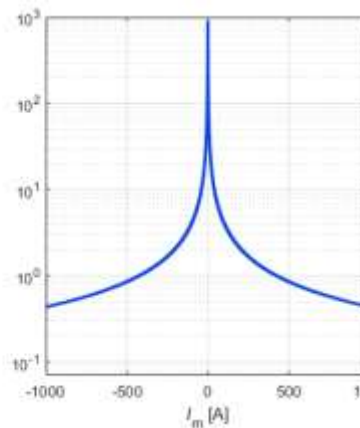
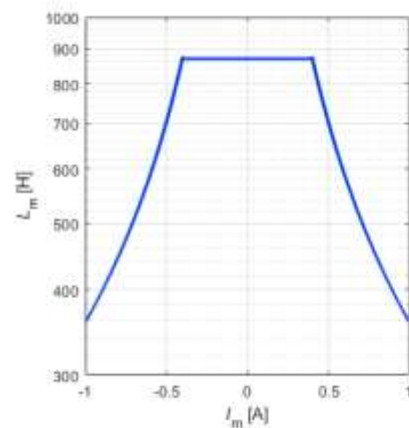
Табл. 4: Синхровекторы тока и напряжения при асинхронном режиме



СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

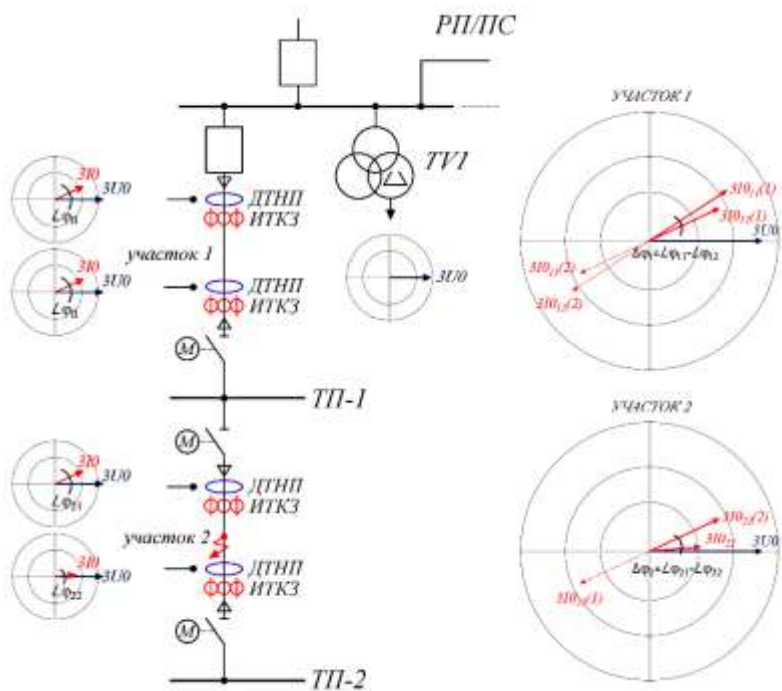


Изменение индуктивности ветви намагничивания при БТН



ЗАЩИТА ОТ ОЗЗ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

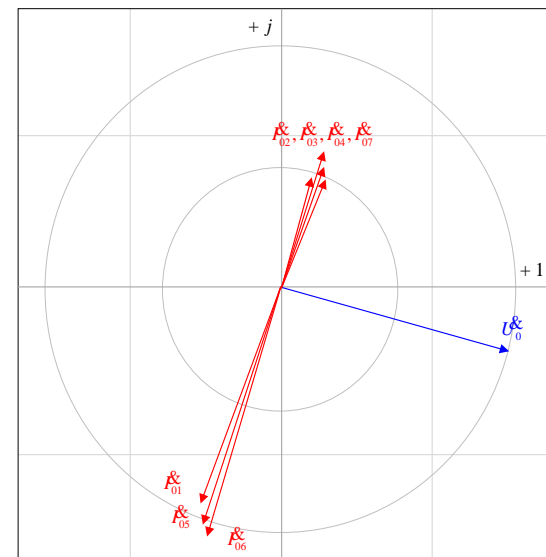
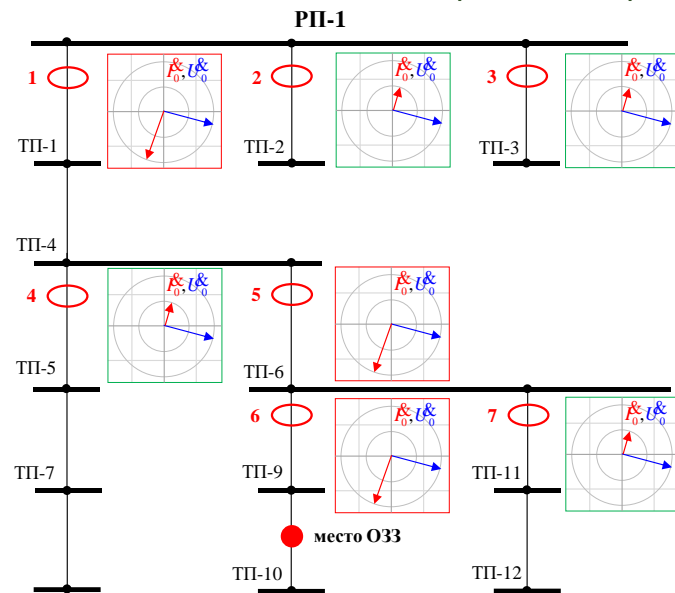
Централизованная защита НП



Оценка емкости через синхровекторы тока и напряжения НП в сети с изолированной нейтралью:

$$\hat{C}_0(t) \approx \frac{3\dot{I}_0(t)}{j\omega_0\dot{U}_0(t) + \dot{U}_0'(t)}$$

Направленная защита НП при использовании эквивалентных синхровекторов высших гармоник



Оценка емкости в сети с компенсацией:

$$\hat{C}_0(t) = -\frac{1}{3} \frac{j\omega_0\dot{I}_0(t) + \dot{I}_0'(t) + L_k^{-1}\dot{U}_0(t)}{\dot{U}_0''(t) + (j2\omega_0 + k)\dot{U}_0'(t) - (\omega_0^2 - j\omega_0k)\dot{U}_0(t)}$$

$$k = \frac{G_0}{C_0} = \frac{G_{0уд}}{C_{0уд}}$$

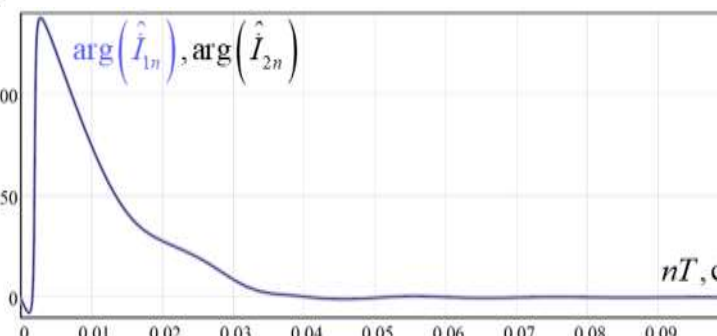
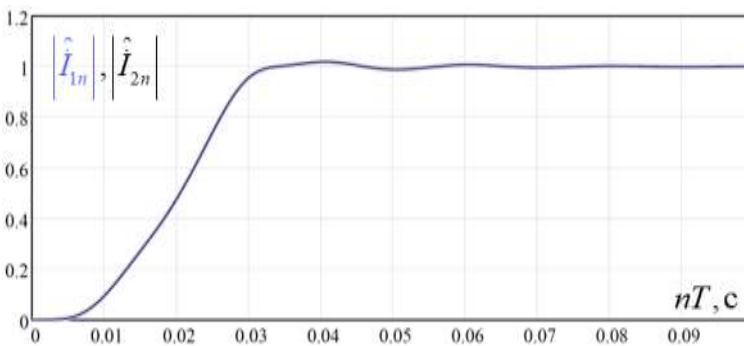
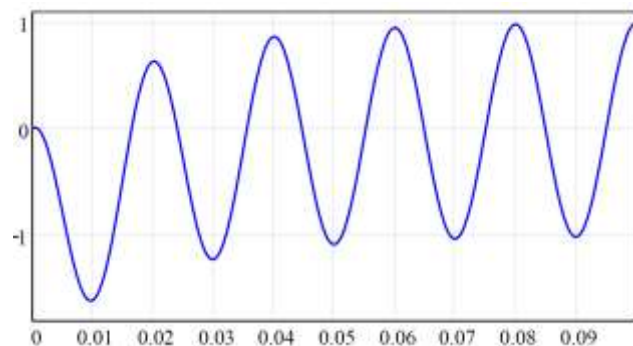
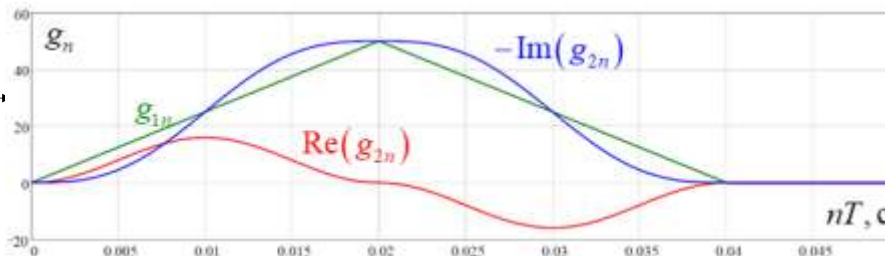
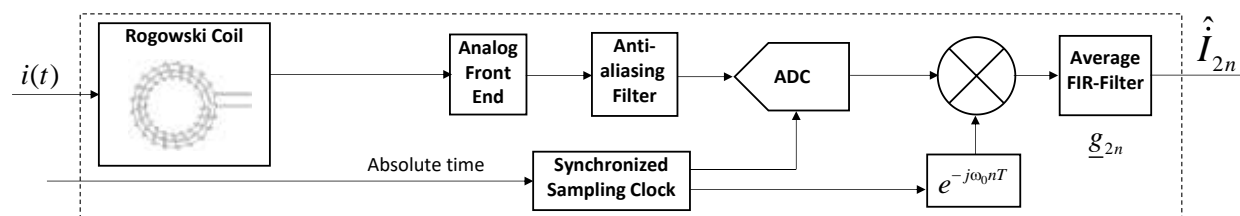
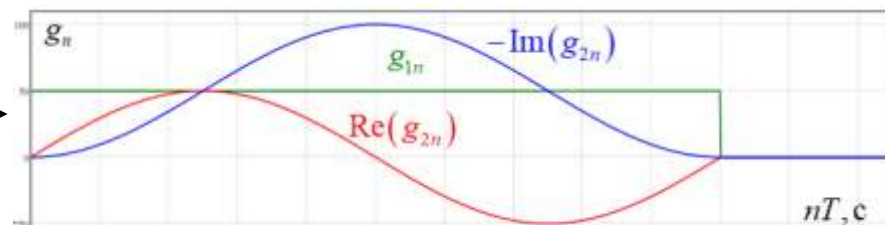
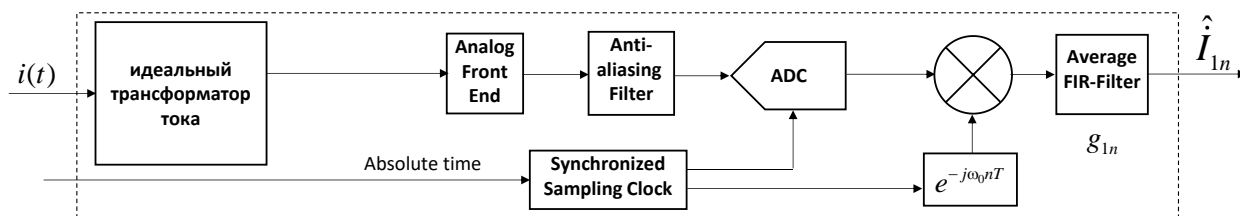
ЦИФРОВОЙ ИТТ НА БАЗЕ КАТУШКИ РОГОВСКОГО



Отличительная особенность первичных измерительных преобразователей тока на основе катушки Роговского связана с пропорциональностью выходного сигнала производной первичного тока.

В ЕСИТ производится дополнительная цифровая обработка сигналов для восстановления первичного тока с последующим формированием SV-поточков и обработка сигналов для формирования синхровекторов тока.

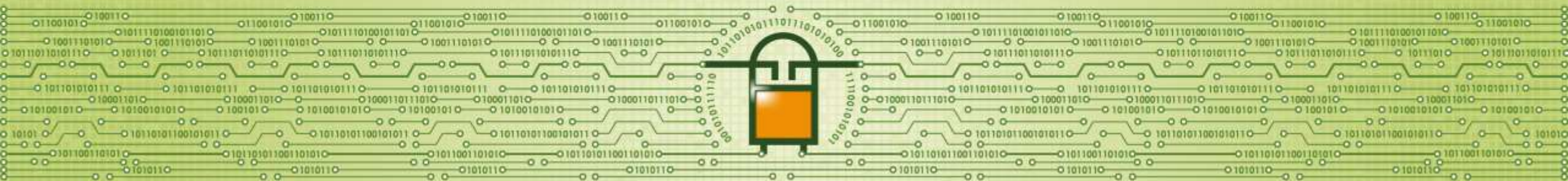
Разработан метод синтеза цифровых фильтров для формирования синхровекторов с учетом особенностей катушки Роговского. При этом вместо усредняющего КИХ-фильтра, необходимо использовать КИХ-фильтр с комплексной импульсной функцией.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ



1. Развитие теории СВИ позволит повысить техническое совершенство систем релейной защиты, автоматики, мониторинга и управления и позволит приступить к реализации распределенных систем WAMPACS.
2. На основе методов анализа исходных синхровекторов напряжения и тока переходных процессов, предложены способы совершенствования устройств релейной защиты, идентификации параметров линий электропередачи, реализация виртуальных УСВИ, систем мониторинга состояния трансформаторов, улучшения динамической оценки состояния энергосистемы.
3. Разработаны алгоритмы быстродействующей дистанционной защиты на основе СВИ. При реализации двухсторонних измерений синхровекторов дистанционная защита будет эффективно отстроена от влияния нелинейного переходного сопротивления дуги, от электромеханических и электромагнитных переходных процессов.
4. Разработан алгоритм направленной защиты от замыканий на землю для распределительных сетей среднего напряжения, основанной на применении эквивалентных синхровекторов тока и напряжения нулевой последовательности высших гармоник. Указанная защита может применяться как локальная, так и в составе распределенных систем защиты от замыканий на землю.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Контакты:

Мокеев Алексей Владимирович,
зам. генерального директора ООО "Инженерный центр "Энергосервис",
профессор Северного (Арктического) федерального университета, д.т.н.
8 (911) 5917591, a.mokeev@ens.ru, a.mokeev@narfu.ru