

КУЛИКОВ А.Л., КОЛОБАНОВ П.А. ПЕТРОВА В.А.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства образования и науки РФ (соглашение
№14.577.21.0124 о предоставлении субсидии от
20.10.2014, уникальный идентификатор проекта
RFMEF157714X0124)

Совершенствование измерительных органов релейной защиты методами цифровой обработки сигналов



НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Сочи, 2015

**ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ 50 ГЦ
В РЗА ОБЫЧНО ИСПОЛЬЗУЕТСЯ
ДИСКРЕТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ
(ДПФ)**

Синусный КИХ-фильтр

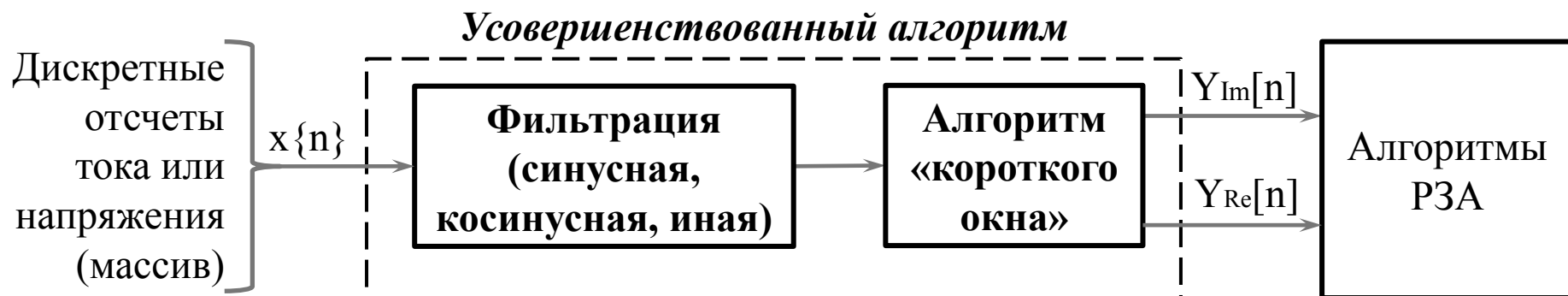
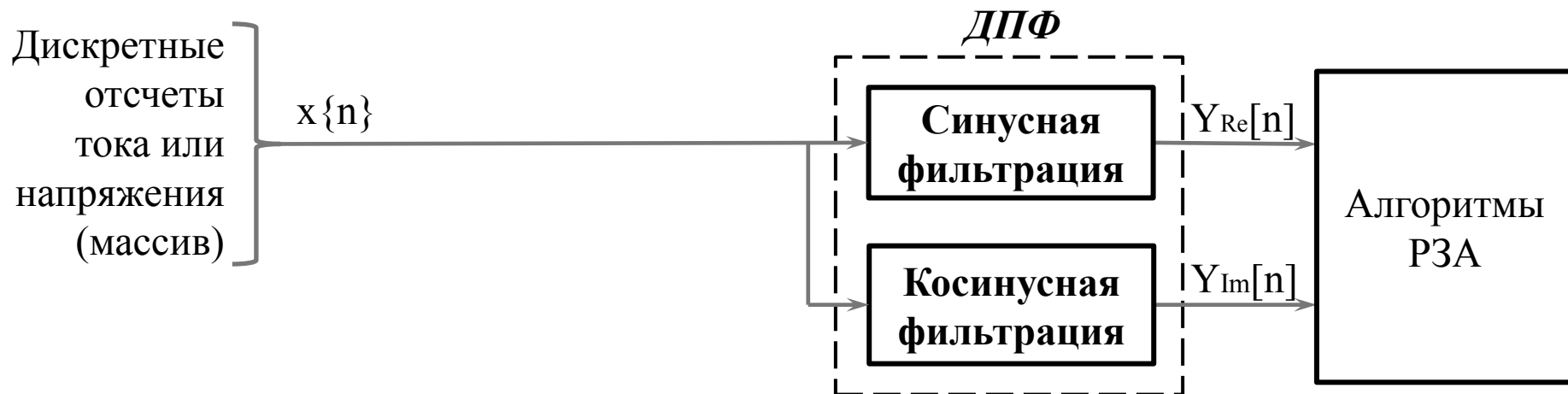
$$Y_{\text{Re}}[n] = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=1}^N x[n - N + k] \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (k - 1)}{N}\right) \quad (1)$$

Косинусный КИХ-фильтр

$$Y_{\text{Im}}[n] = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=1}^N x[n - N + k] \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot (k - 1)}{N}\right) \quad (2)$$

- Не всегда обеспечивается оптимальный уровень подавления посторонних гармоник
- Невысокое быстродействие (т.к. 2 фильтра)

СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ АЛГОРИТМОВ: **ДПФ** И **УПРОЩЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**



Этапы усовершенствованного алгоритма обработки сигналов

1) Обработка массива данных **одним** фильтром (напр., синусным)

2) Расчет по одному из алгоритмов, используя несколько отфильтрованных отсчетов

Трехвыборочный алгоритм

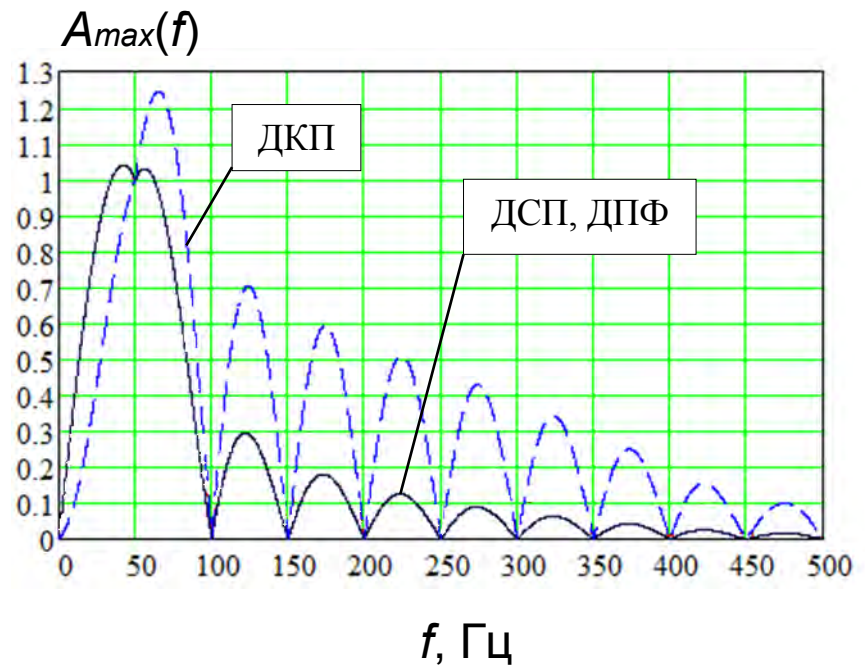
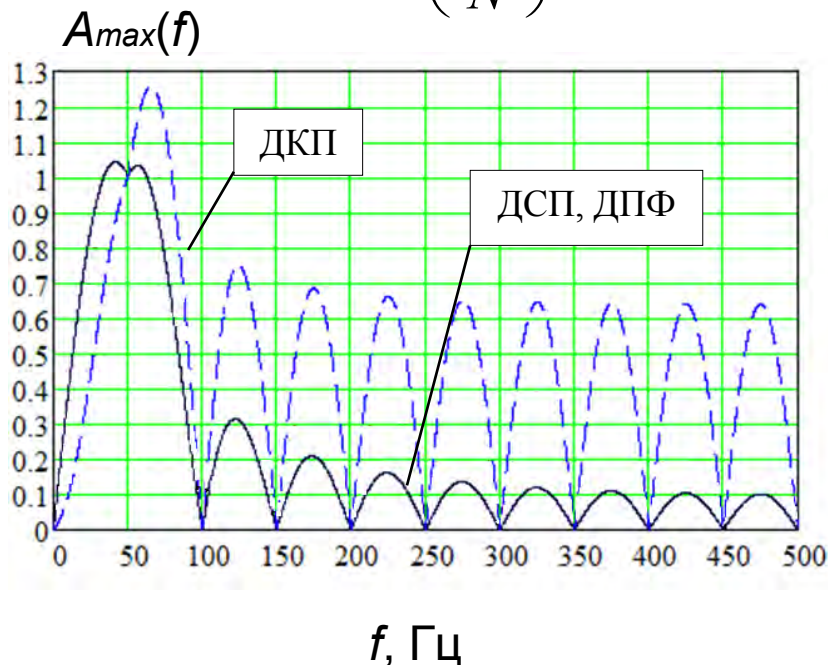
$$Y_{\text{Re}}[n] = X[n-1]$$

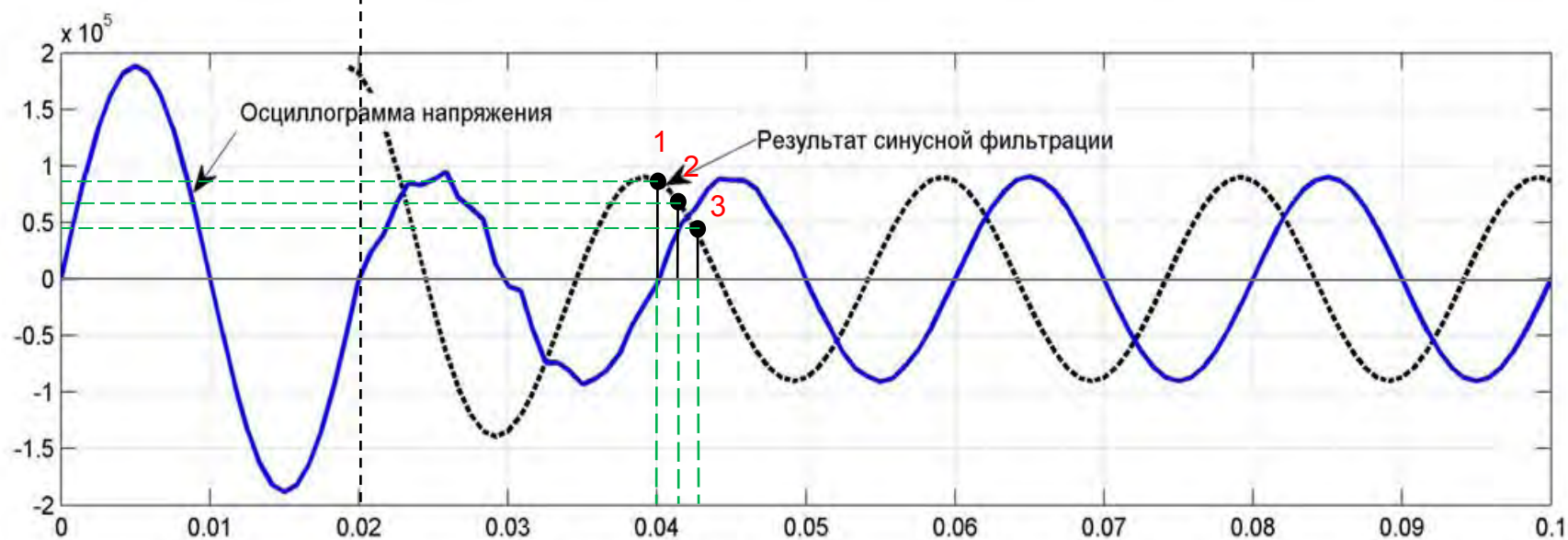
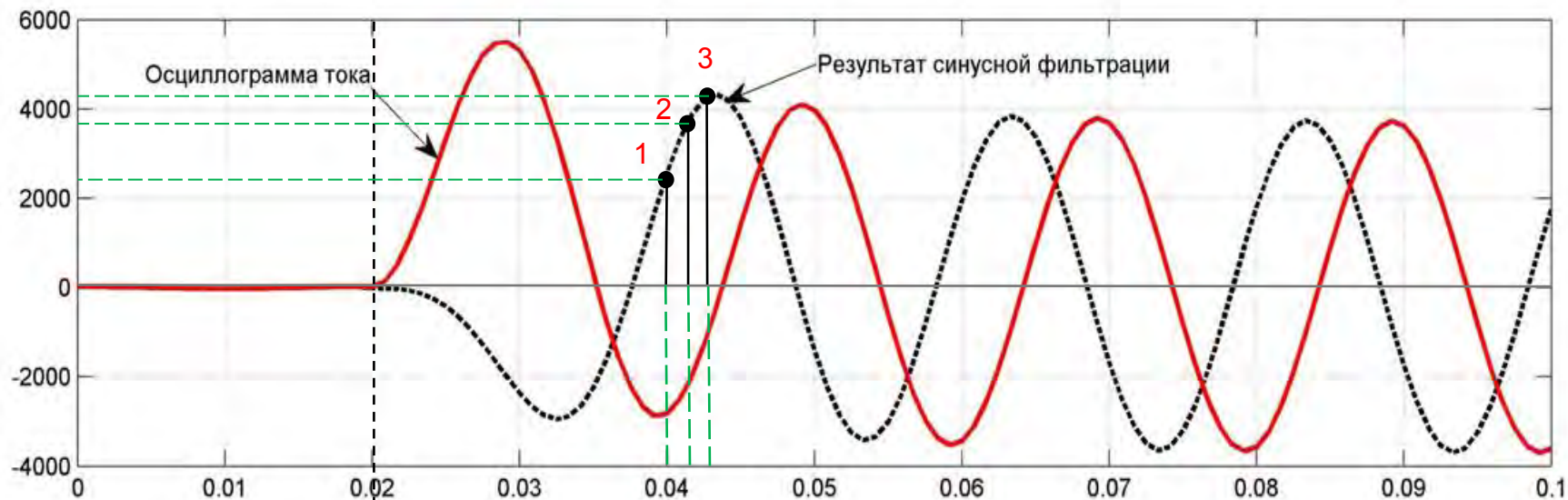
$$X_{\text{Im}}[n] = \frac{X[n-2] - X[n]}{2 \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)}$$

Двухвыборочный алгоритм

$$Y_{\text{Re}}[n] = X[n]$$

$$Y_{\text{Im}}[n] = \frac{1}{\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)} \left(X[n-1] - X[n] \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) \right)$$





Цифрами обозначены отфильтрованные отсчеты

КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

**ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ НА ЭТАПЕ 1
ПОДБОРОМ СПЕЦИАЛЬНОГО ФИЛЬТРА**

$$(1) \quad X[n] = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x[n - N + k] \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi(k-1)}{N}\right) + h_1 \right)$$

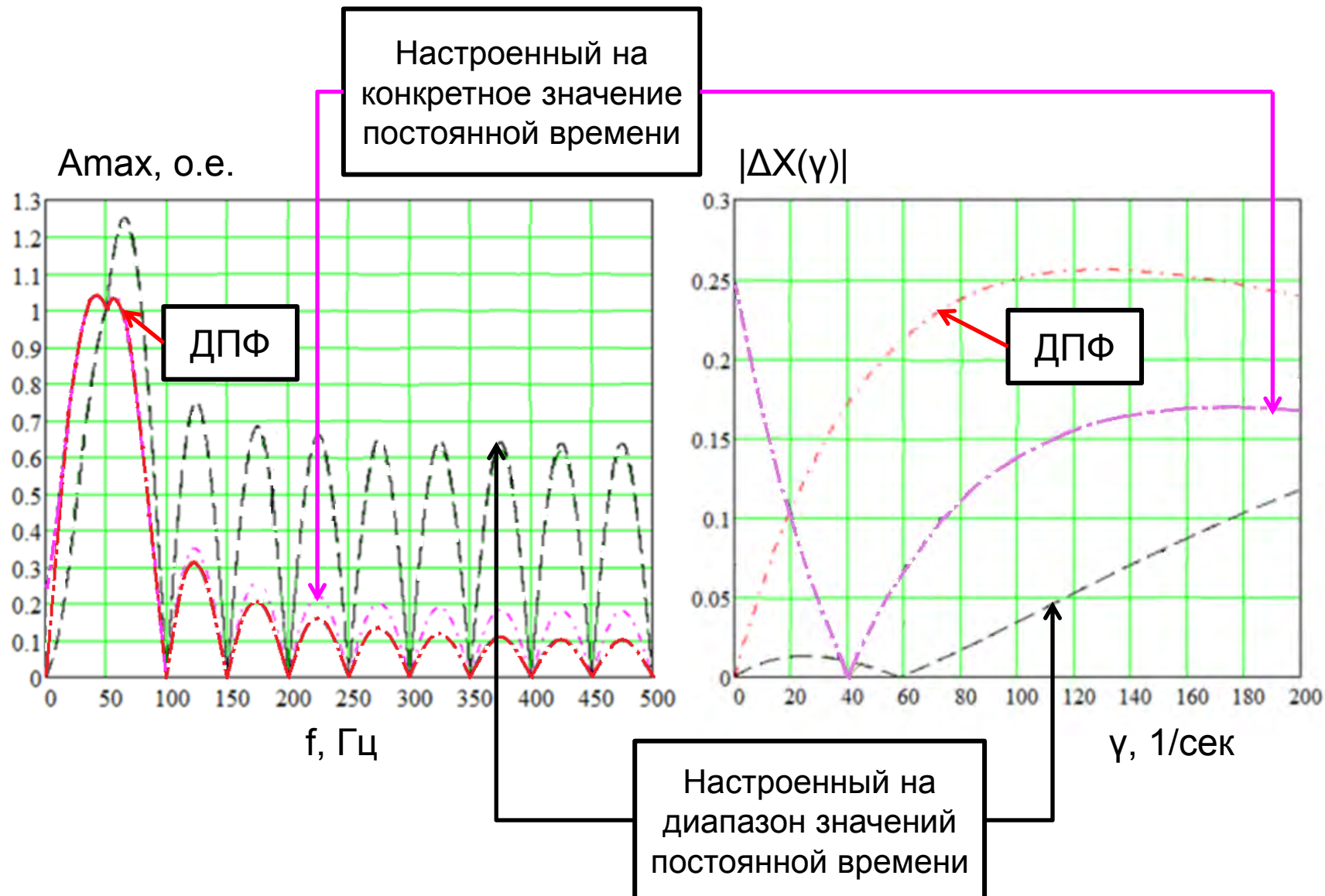
$$(2) \quad X[n] = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x[n - N + k] \cdot \left(\sin\left(\frac{2\pi(k-1)}{N}\right) + h_2 \right)$$

	γ=20 1/сек.	γ=40 1/сек.	γ=60 1/сек.	γ=80 1/сек.	γ=100 1/сек.	γ=120 1/сек.	γ=140 1/сек.
h1	-0,01393022	-0,03537456	-0,06356735	-0,09748136	-0,13592737	-0,17765841	-0,22146289
h2	-0,06225592	-0,12179187	-0,1773189	-0,22780965	-0,27254991	-0,31115033	-0,34352339

$$(3) \quad X[n] = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x[n - N + k] \cdot \sin\left(\frac{2\pi(k-1)}{N} - \varphi\right)$$

	γ=20 1/сек.	γ=40 1/сек.	γ=60 1/сек.	γ=80 1/сек.	γ=100 1/сек.	γ=120 1/сек.	γ=140 1/сек.
N=20	π/2,45	π/2,55	π/2,65	π/2,77	π/2,91	π/3,09	π/3,24
N=36	π/2,3	π/2,43	π/2,5	π/2,61	π/2,74	π/2,88	π/3,03

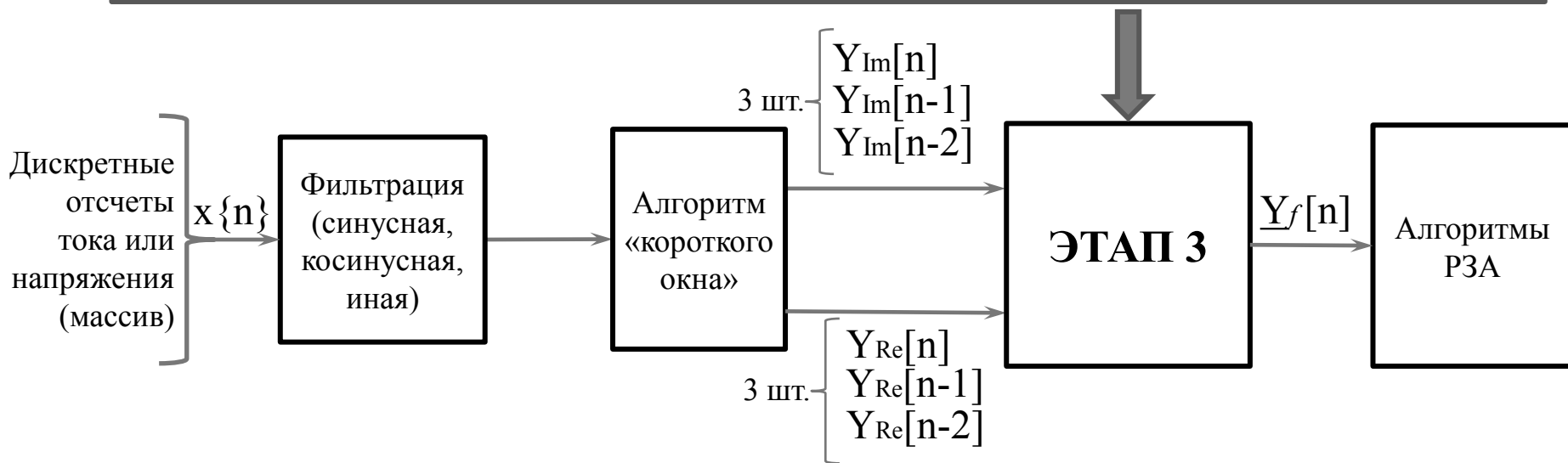
ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРОЩЕННЫХ АЛГОРИТМОВ



ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МОЖЕТ БЫТЬ ОСУЩЕСТВЛЕНА ВВЕДЕНИЕМ ЭТАПА 3

$$\underline{Y}_f[n] = \frac{\underline{Y}[n-1] - \underline{d}[n] \cdot \underline{Y}[n-2]}{\underline{a} - \underline{d}[n]}$$

$$\underline{a} = \exp\left(j \frac{2\pi}{N}\right); \quad \underline{d}[n] = e^{-\gamma T} = \frac{\underline{Y}[n] - \underline{a} \cdot \underline{Y}[n-1]}{\underline{Y}[n-1] - \underline{a} \cdot \underline{Y}[n-2]}$$

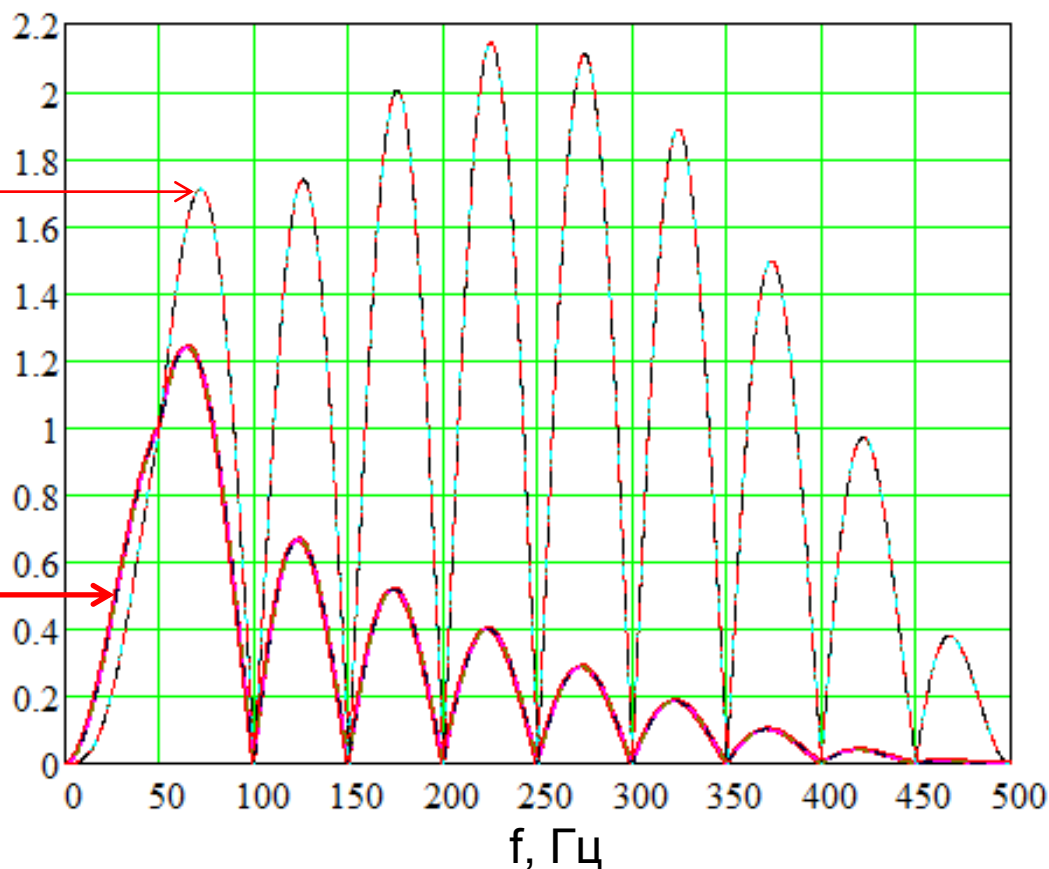


АЧХ АЛГОРИТМОВ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ПОДАВЛЕНИЕМ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

$A_{\max}$, о.е.

На основе
косинусного
фильтра

На основе
синусного
фильтра



В ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЕ МОЖЕТ БЫТЬ ПРИМЕНЕН АЛГОРИТМ

НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ЛИНИИ

Этап 1: фильтрация синусным фильтром

Этап 2: нахождение производных фазных токов численно $\frac{di[k]}{dt} = \frac{i[k+1] - i[k-1]}{2 \cdot \Delta t}$

Контур фаза-фаза

$$u_{\phi 1}[k] - u_{\phi 2}[k] = R1 \cdot (i_{\phi 1}[k] - i_{\phi 2}[k]) + L1 \cdot \left(\frac{di_{\phi 1}[k]}{dt} - \frac{di_{\phi 2}[k]}{dt} \right)$$

Контур фаза-земля

$$u_{\phi}[k] = R1 \cdot (i_{\phi}[k] + k_{RE} \cdot 3i_0[k] + k_{RP} \cdot 3i_{02}[k]) + L1 \cdot \left(\frac{di_{\phi}[k]}{dt} + k_{XE} \cdot \frac{d3i_0[k]}{dt} + k_{RP} \cdot \frac{d3i_{02}[k]}{dt} \right)$$

$$k_{RE} = \frac{R0 - R1}{3 \cdot R1} \quad k_{XE} = \frac{X0 - X1}{3 \cdot X1} \quad k_{RP} = \frac{Rp}{3 \cdot R1} \quad k_{XP} = \frac{Xp0}{3 \cdot X1} \quad 3i_0[k] = i_a[k] + i_b[k] + i_c[k]$$

Общий вид

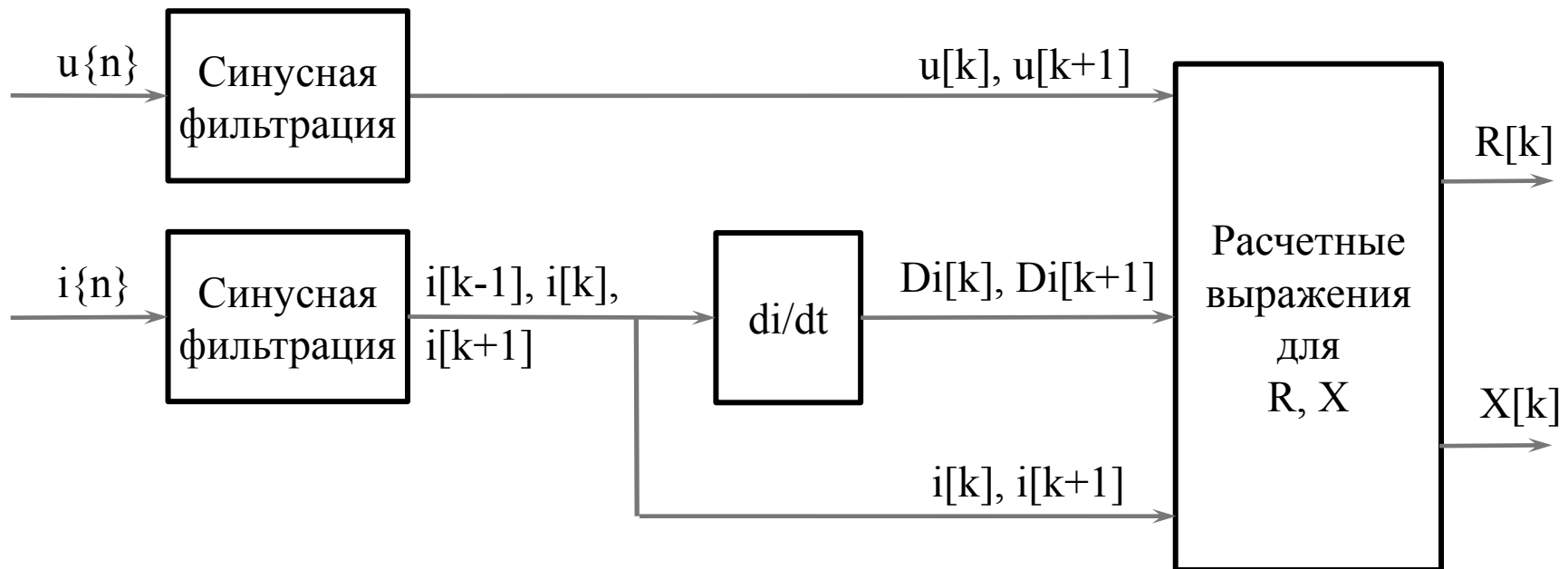
$$u[k] = R \cdot i[k] + L \cdot Di[k]$$
$$u[k+1] = R \cdot i[k+1] + L \cdot Di[k+1]$$

Расчетные выражения

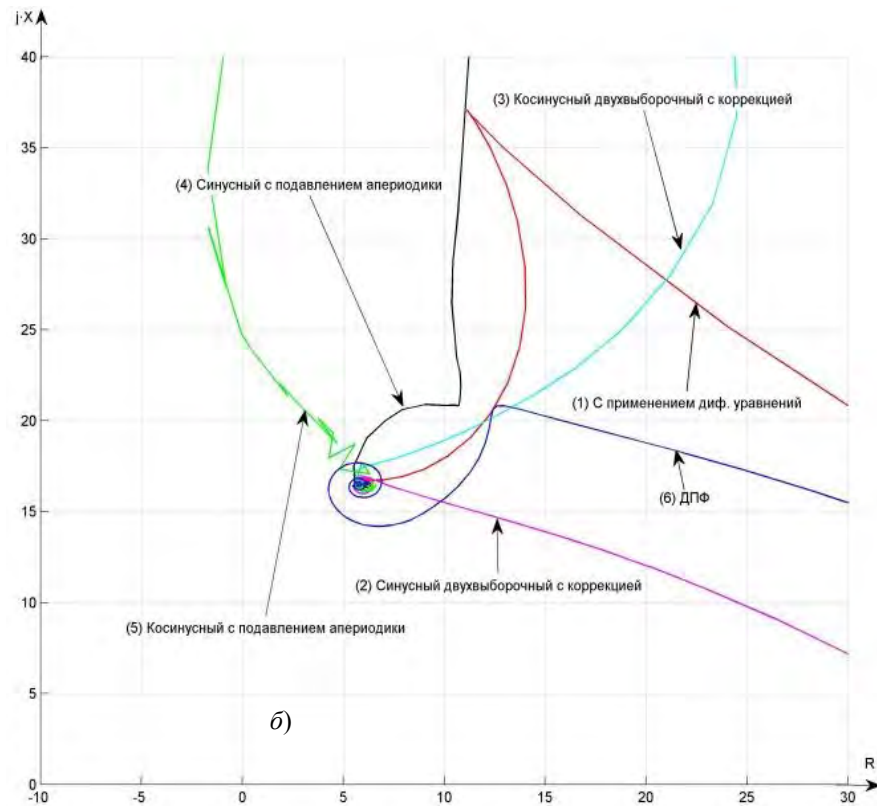
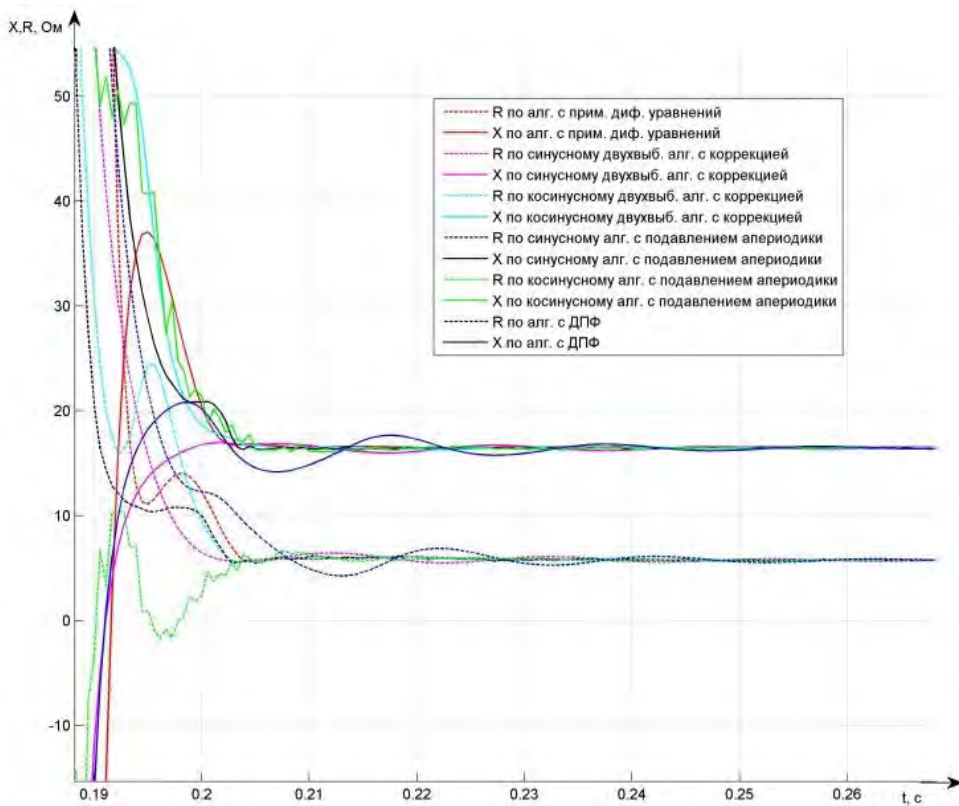
$$R1 = \frac{u[k] \cdot Di[k+1] - u[k+1] \cdot Di[k]}{i[k] \cdot Di[k+1] - i[k+1] \cdot Di[k]}$$

$$X1 = \omega \cdot \frac{u[k] \cdot i[k+1] - u[k+1] \cdot i[k]}{i[k] \cdot Di[k+1] - i[k+1] \cdot Di[k]}$$

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АЛГОРИТМА ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ЛИНИИ



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ НА ПРИМЕРЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ



ВЫВОДЫ:

- Упрощенная цифровая фильтрация аварийных токов и напряжений **позволяет сократить количество вычислительных операций** в измерительных органах для решения более сложных задач релейной защиты
- Разработанные алгоритмы измерительных органов на основе цифровой обработки сигналов **обладают улучшенными динамическими характеристиками**. Они не требуют доработки аппаратных средств, реализуются программно и **могут быть внедрены в существующие и перспективные терминалы защиты**

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!