

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Факультет энергетики и электротехники

Кафедра электрических и электронных аппаратов

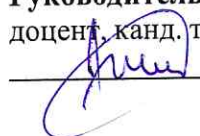
КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

на тему:

**«Цифровое реле максимального напряжения на основе алгоритма
вычисления мгновенных значений»**

Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
направленность (профиль) «Общая теория электромеханического преобразования
энергии»

Выполнил:
обучающийся группы МЭЭТ-01-22
 А.В. Катмаков

Руководитель:
доцент, канд. техн. наук, доц.
 И.К. Никифоров

15 мая 2023

И.К. Никифоров

Чебоксары 2023

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова»

Факультет Энергетики и электротехники
Кафедра Электрических и электронных аппаратов

ЗАДАНИЕ

на курсовой проект

По дисциплине Микропроцессорное реле.
Обучающемуся Катмакову Артемию Валерьевичу МЭЭТ-01-22 (ОТЭМПЭ)
Тема работы: Цифровое реле максимального напряжения на основе алгоритма вычисления мгновенных значений.

Исходные данные к работе:

Реализовать на основе алгоритма вычисления мгновенных значений (см. [1, с. 363; ЦИО 2-го порядка; с. 367]) цифровое реле максимального напряжения. Дано: номинальное вторичное напряжение ТН 110 В; коэффициент масштабирования $k_U=24$; частота сети 50 Гц. Рассмотреть расчеты для разрядности АЦП: $n=10, 12, 14, 16$. Первичное номинальное напряжение 220 В, порог срабатывания РН от 245 В и выше. Считать, что при аварийном режиме в спектре появляются апериодическая составляющая и 3, 5, 7 и 9 гармоники. Сделать выводы, при какой разрядности АЦП достигается допустимая погрешность вычислений параметров тока и фазы $\pm 10\%$; показать все необходимые расчеты и полученные диаграммы.

Содержание расчетно-пояснительной записки:

Введение.

1. Теоретическая часть

1.1 Микропроцессорные реле

1.2 Алгоритмы цифровых измерительных органов.

2. Расчетная часть

2.1 Расчет для $n=10$

2.2 Расчет для $n=12$

2.3 Расчет для $n=14$

2.4 Расчет для $n=16$

3. Расчет графических характеристик ЦИО

Заключение

Список использованных источников

Приложение

Перечень графического материала:

- временные и частотные диаграммы в комплексной плоскости;
- импульсные и частотные характеристики (АЧХ, ФЧХ);
- структура цифрового фильтра (узла цифрового реле).

При выполнении работы студент должен:

- критически и всесторонне анализировать проблемную ситуацию на основе системного подхода, выявляя ее компоненты и причинно-следственные связи (УК-1.2);
- выстраивать гибкую профессиональную траекторию с использованием инструментов непрерывного образования (УК-6.3);
- владеть методами анализа создания и развития объектов техники и применения нормативно-технической документации в области научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (ПК-1.1);
- уметь пользоваться специальным программным обеспечением для разработки проектной и конструкторской документации (ПК-2.3).

Список рекомендуемой литературы

1. *Никитин, А.А.* Аппараты релейной защиты: учеб. пособие/ А.А. Никитин, Э.М. Шнеерсон. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2008. – 524 с.
2. *Никитин, А.А.* Микропроцессорные реле: учеб. пособие/ А.А. Никитин. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. 2006. – 448 с.
3. *Шнеерсон Э.М.* Цифровая релейная защита. – М: Энергоатомиздат. 2007. – 549 с.
4. *Дьяченко М.Д.* Цифровая защита (аппаратное и программное обеспечение): учеб. пособие. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2014. – 304 с.
5. *Никитин, А.А.* Цифровая релейная защита. Основы синтеза измерительной частимикропроцессорных реле: текст лекций. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. 2014. – 240 с.

Дата выдачи задания «6» февраля 2023 г.

Руководитель _____ /И.К. Никифоров/

Задание принял к исполнению (дата) «6» февраля 2023 г.

Подпись студента _____ / А.В. Катмаков/

Оглавление

Введение	5
1. Теоретическая часть	7
1.1 Микропроцессорные реле.....	7
1.2 Алгоритмы цифровых измерительных органов.....	10
1.2.1 Общие положения	10
1.2.2. Алгоритм ЦИО по основе вычисления мгновенных значений.	11
2. Расчетная часть	14
2.1 Расчет для $n=10$	14
2.2 Расчет для $n=12$	15
2.3 Расчет для $n=14$	17
2.4 Расчет для $n=16$	19
3. Расчет графических характеристик ЦИО	21
Заключение.....	22
Список использованных источников	23
Приложение А.....	24

Введение

В релейной защите в последнее десятилетие произошли качественные изменения, вызванные широким использованием цифровой (микропроцессорной) техники. Указанное обусловлено, в первую очередь, существенными преимуществами релейной защиты на микропроцессорной основе по сравнению с электромеханической и электронной релейной защитой. Эти преимущества заключаются, прежде всего, в следующем:

- повышении аппаратной надежности, уменьшении массы и габаритов устройств, благодаря существенному уменьшению числа используемых блоков и соединений (одно микропроцессорное устройство выполняет обычно различные защитные функции, для реализации которых ранее требовалось несколько устройств);
- в существенном повышении удобства обслуживания и возможности сокращения обслуживающего персонала;
- в расширении и улучшении качества защитных функций (чувствительности, селективности, статической и динамической устойчивости функционирования);
- возможности непосредственной регистрации процессов и событий и анализа возникших в энергосистеме повреждений;
- принципиально новых возможностях управления защитой и передачи от нее информации на географически удаленные уровни управления;
- технологичности производства.

Принципы построения и алгоритмы, используемые в цифровой релейной защите (ЦРЗ), во многом отличаются от применяемых в электромеханических и электронных релейных защитах, ввиду существенно различающихся технической основы и способов обработки информации. Новые возможности цифровой обработки сигналов и обмена информацией, позволяют реализовать целый ряд защитных функций, которые невозможно было осуществить ранее.

Измерительные органы устройств релейной защиты, в которых при обработке информации выполняются операции с последовательностями чисел,

зависящими от текущих значений входных напряжений и токов, являются цифровыми – ЦИО. Использование цифровой обработки сигналов и соответствующих методов их преобразования обуславливает новые свойства ЦИО, отсутствующие у аналоговых релейных измерительных органов [1], что требует учёта их при проектировании современных микропроцессорных комплексов РЗА.

Для оценки поведения ЦИО в реальных режимах работы электрической системы необходимы исследования методов реализации их характеристик, влияния частоты дискретизации входных сигналов на характеристики ЦИО, частотных характеристик ЦИО, поведения их в динамических условиях.

1. Теоретическая часть

1.1 Микропроцессорные реле

Принципы построения устройств релейной защиты, в том числе и микропроцессорных, весьма разнообразны. Однако в подавляющем большинстве эти устройства являются автономными и выполняются с использованием электрических воздействующих величин — токов и напряжений промышленной частоты защищаемых элементов системы. Иногда, в качестве дополнительной информации, могут использоваться некоторые физические явления неэлектрического характера, сопровождающие короткие замыкания (КЗ) и ненормальные режимы защищаемого элемента электрической системы. В частности, может использоваться световая вспышка (при дуговых КЗ), изменение скорости выделения газов (газовые реле), повышение температуры элементов защищаемого объекта, вибрация электрической машины и т.д. В общем случае устройства релейной защиты имеют две основные части — измерительную и логическую [2].

Измерительная часть (U_3), включающая релейный измерительный орган (РИО), непрерывно контролирует состояние защищаемого объекта и определяет условия срабатывания в соответствии со значениями входных величин. Таковыми являются вторичные токи измерительных трансформаторов тока (ТА) и вторичные напряжения измерительных трансформаторов напряжения (ТВ). Логическая часть (U_5) формирует управляющие воздействия в зависимости от комбинации и последовательности поступления на неё сигналов от РИО. Логическая часть действует на выключатель не непосредственно, а через исполнительные органы (электрохимические реле $KL_1, \dots$).

Для защит с абсолютной селективностью измерительная и логическая части могут получать также информацию с другой стороны защищаемого элемента (другой электроустановки) по специальным каналам связи. Сигнальные органы (H_1) информируют о срабатывании комплекта защиты в

целом, иногда и отдельных её частей. Для питания измерительных, исполнительных и сигнальных органов, логической части предусматривается

источник питания. На вход устройства релейной защиты непрерывно подаются аналоговые величины, пропорциональные значениям напряжений TV_1 – измерительный трансформатор напряжения; TA_1 – измерительный трансформатор тока; Q_1 – выключатель; SQ_1 – контакт выключателя; YAT_1 – катушка отключения выключателя; SA_1 – ключ управления.

Обобщённая структура устройства релейной защиты и токов защищаемого объекта. Определённый выходной сигнал (например, сигнал "Отключить") должен быть автоматически получен лишь в том случае, если входные величины удовлетворяют некоторым условиям. Наличие этих условий фиксируется РИО, который подает сигнал одного вида, если определённое условие удовлетворяется, и иной сигнал, если оно не удовлетворяется.

Таким образом, измерительный орган преобразовывает аналоговый сигнал на входе, например, напряжение в дискретный сигнал на выходе. К измерительным органам относятся: - реле тока (напряжения), действие которого зависит от мгновенного или интегрального значения входной воздействующей величины; - реле направления мощности, зона действия которого определяется фазовым углом между векторами напряжения и тока; 7 - реле сопротивления, действие которого определяется от векторного отношения напряжения и тока; - реле частоты, действие которого зависит от частоты и др. Условно можно считать, что РИО состоит из двух частей. В большинстве устройств релейной защиты первая часть – измерительная схема – преобразует поступающий на вход аналоговый сигнал в сигнал также аналоговый, используемый в качестве входного во второй части РИО – схеме сравнения. Входные сигналы РИО несут определенную информацию о режиме работы защищаемого объекта. Для выявления аварийного режима из подведенных напряжений и токов с помощью измерительной части могут

формироваться специальные непрерывные величины, характерные только для аварии. Так, из трёх фазных напряжений и токов выделяются симметричные составляющие обратной и нулевой последовательностей, на основе анализа которых можно определить вид КЗ и его "место". В схеме сравнения обрабатываются подготовленные измерительной схемой непрерывные величины. В зависимости от соотношения этих величин на выходе схемы сравнения появляется или не появляется определенный стандартный сигнал. Именно схема сравнения преобразует непрерывные сигналы на входе в дискретный сигнал на выходе. Выходные дискретные сигналы РИО обрабатываются в логической части. Здесь же обрабатываются дискретные сигналы, поступающие от реле выключателя и других устройств РЗА через входные преобразователи (U_1, U_2). Сигнал управления от персонала в виде дискретного поступает в логическую часть также через входной преобразователь (U_4). Выходной сигнал логической части является, по сути, выходным дискретным сигналом всего устройства, т.е. логическая часть преобразует дискретные входные сигналы в дискретные выходные [2]. Микропроцессорные реле имеют много особенностей по сравнению с электронными в части, касающейся обработки аналоговых сигналов, цифровой фильтрации преобразованных аналоговых сигналов, построения измерительных органов, каналов передачи данных и т.д.

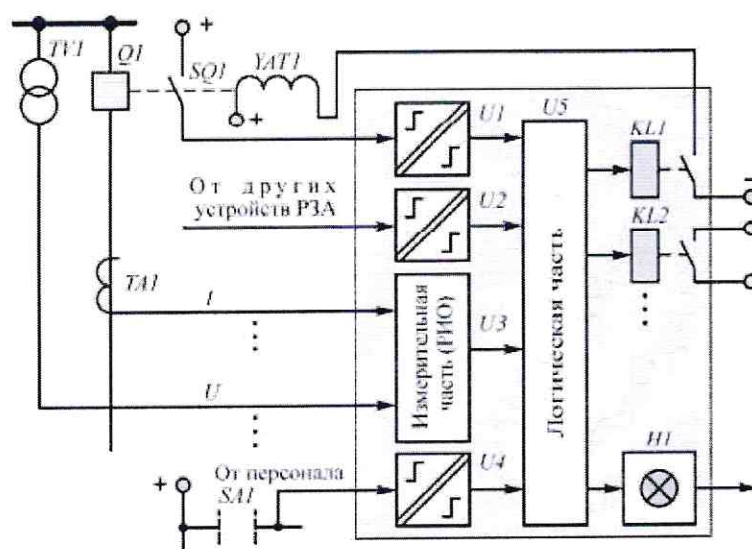


Рисунок – 1 Обобщённая структура устройства релейной защиты



Рисунок – 2 Обобщённая аппарата релейной защиты.

1.2 Алгоритмы цифровых измерительных органов.

1.2.1 Общие положения

В аналоговых устройствах защиты осуществляется измерение параметров контролируемых синусоидальных величин электрической системы путем воздействия непрерывных аналоговых сигналов, зависящих от входных токов и напряжений, на физическую систему (индукционную, электромагнитную, полупроводниковую и т.д.). По результатам этого воздействия оценивается нахождение контролируемых параметров в заданной области, на основании чего принимается решение, соответствующее алгоритму работы защиты. Например, срабатывание измерительного органа максимальной токовой защиты, дающего команду реле времени на отсчёт выдержки времени, соответствует при синусоидальном токе превышению его амплитудой заранее заданного значения (действующее значение превышает уставку).

Основные операции в ЦИО производятся не с аналоговыми сигналами, а с чередующимися во времени с периодом T_d последовательностями двоичных чисел, соответствующими дискретным сигналам, полученным при цифровой обработке входных аналоговых сигналов.

Алгоритмом ЦИО называется последовательность операций с цифровыми отсчётами (выборками), зависящими от входных аналоговых сигналов, обеспечивающая измерение контролируемых параметров электрической системы или оценку их нахождения в заданной области.

Все рассматриваемые алгоритмы обеспечивают необходимые характеристики ЦИО при условии, что производятся операции с цифровыми последовательностями вида (2.1), обусловленными цифровой обработкой только синусоидальных сигналов частоты 50 Гц ($\omega_1 = 314 \text{ с}^{-1}$), т.е.

составляющие других частот практически отсутствуют.

В основу рассматриваемых алгоритмов положена возможность определения амплитуды U_m и фазы у входного синусоидального сигнала

$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi)$, изменяющегося с частотой $\omega = \omega_1$, по известным в произвольный момент времени t мгновенным значениям сигнала $u(t)$ и его первой $du/dt = \omega U_m \cos(\omega t + \psi)$ и второй $d^2u/dt^2 = -\omega^2 U_m \sin(\omega t + \psi)$ производных.

1.2.2. Алгоритм ЦИО на основе вычисления мгновенных значений.

Синусоидальный сигнал $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi)$ в векторном представлении записывается как $U_m e^{j(\omega t + \psi)} = U_m e^{j\omega t} = U_x + jU_y$, чему соответствует геометрическое отображение, показанное на рисунке рис. 3, а. Амплитуда синусоидальной величины U_m и фаза ψ , как это следует из известных тригонометрических соотношений, иллюстрируемых рисунком рис. 3, а, могут быть вычислены по формулам

$$U_m = \sqrt{u^2(t) + \left(\frac{1}{\omega} \frac{du}{dt}\right)^2}; \quad \psi = \arctg \frac{\omega u(t)}{du/dt} - \omega t. \quad (1)$$

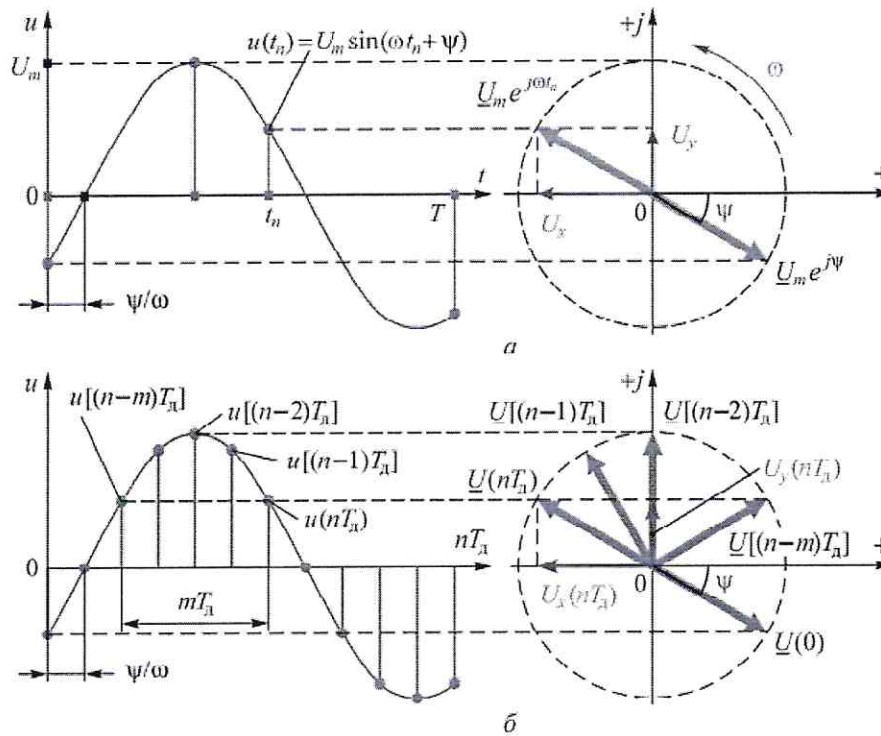


Рисунок 3 – Векторное представление синусоидальных величин:

а – напряжение и соответствующий ему вектор;

б – дискретизированное напряжение

Этим формулам соответствует векторное соотношение

$$\underline{U}(t) = \frac{1}{\omega} \frac{du}{dt} + ju(t). \quad (2)$$

Из уравнений (1, 2) относительно легко получаются алгоритмы, определяющие вектор $\underline{U}(nT_d) = U_m e^{j\omega nT_d}$, соответствующий цифровой форме дискретизированного синусоидального сигнала $u(nT_d) = U_m \sin(\omega nT_d + \psi)$.

Если для вычисления первой производной использовать выборки $u(nT_d)$ и $u[(n-1)T_d]$ дискретизированного синусоидального сигнала (рисунок 3, б), то можно принять

$$u(t) = u(nT_d); \quad \frac{du}{dt} \approx \frac{1}{T_d} \{u(nT_d) - u[(n-1)T_d]\} \quad (3)$$

откуда с учётом (2) и соотношения $\omega T_d = \omega T/N = 2\pi/N$, где T – период частоты напряжения $u(t)$, а $N = T/T_d$ – число выборок за период, получается

алгоритм вычисления вектора $\underline{U}(nT_d)$:

$$\underline{U}(nT_d) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(nT_d) - \frac{N}{2\pi} u[(n-1)T_d]. \quad (4)$$

Алгоритм (4) не является точным по причине приближённого вычисления производной по формуле (3), т.е. по двум выборкам.

Вычисление вектора $\underline{U}(nT_d)$ на основе соотношения (2) возможно и посредством усреднения замера мгновенного значения на отрезке T_d :

$$u(t) \approx \frac{1}{2} \{u(nT_d) + u[(n-1)T_d]\}; \quad \frac{du}{dt} \approx \frac{1}{T_d} \{u(nT_d) - u[(n-1)T_d]\}.$$

Тогда вектор $\underline{U}(nT_d)$ вычисляется по формуле

$$\underline{U}(nT_d) = \frac{1}{2} \left(\frac{N}{\pi} + j\right) u(nT_d) + \frac{1}{2} \left(j - \frac{N}{\pi}\right) u[(n-1)T_d]. \quad (5)$$

Ещё более точное вычисление вектора получается, если используются три выборки – $u(nT_d)$, $u[(n-1)T_d]$, $u[(n-2)T_d]$.

В этом случае можно принять

$$u(t) \approx u[(n-1)T_d]; \quad \frac{du}{dt} \approx \frac{1}{2T_d} \{u(nT_d) - u[(n-2)T_d]\}. \quad (6)$$

следовательно, вектор $\underline{U}(nT_d)$ вычисляется по формуле

$$\underline{U}(nT_d) = \frac{N}{4\pi} \{u(nT_d) - u[(n-2)T_d]\} + ju[(n-1)T_d]. \quad (7)$$

2. Расчетная часть

2.1 Расчет для $n=10$

При расчете считаем, что амплитуда входного напряжения в относительных единицах $U_m=1$ при номинальном напряжении ТН 100 В. Здесь и далее будем рассматривать фазу А, для остальных фаз принцип расчета аналогичен.

На вход блока измерений ЦИО последовательно поступают цифровые отсчёты напряжения в аварийном режиме (согласно осциллограмме, на рисунке 4), представленные в таблице 1:

Таблица 1 – Значения цифровых отсчетов для $u(t)$

$u(-2T_d)$	$u(-1T_d)$	$u(0)$	$u(1T_d)$	$u(2T_d)$	$u(3T_d)$	$u(4T_d)$
-0,951	-0,588	0,000	0,588	0,951	0,951	0,588
$u(5T_d)$	$u(6T_d)$	$u(7T_d)$	$u(8T_d)$	$u(9T_d)$	$u(10T_d)$	$u(11T_d)$
0,000	-0,588	-0,951	-0,951	-0,588	0,000	0,588

Графики функций трех фаз напряжений $u(t)$ представлены на рисунке 4.

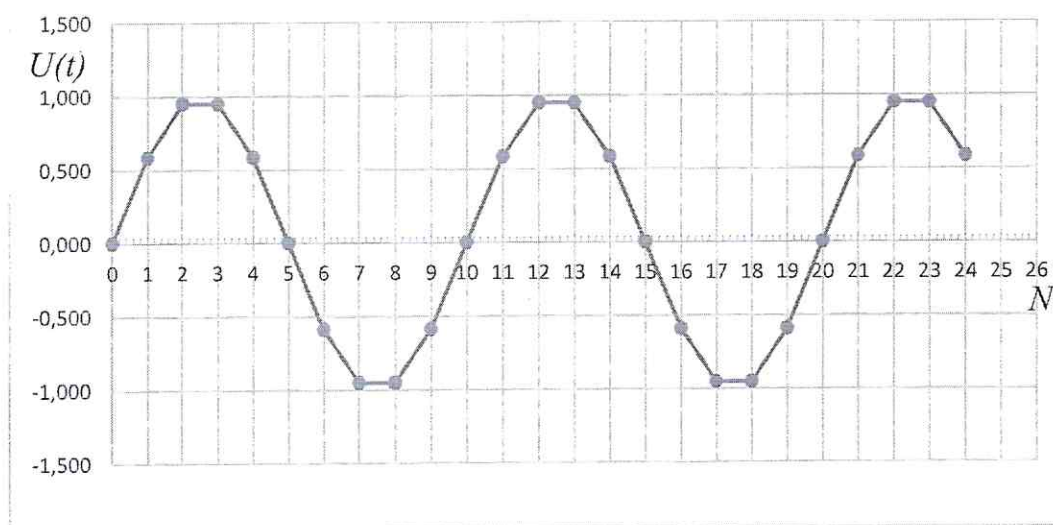


Рисунок 4 - Дискретизированные входные сигналы напряжения на входе ЦИО в аварийном режиме при $n=10$

Проведем расчет ЦИО:

$$U(1) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(T_d) - \frac{N}{2\pi} u(0) = 0,93 + 0,588j = 1,1 * e^{j0,56}$$

$$U(2) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(2T_d) - \frac{N}{2\pi} u(T_d) = 0,57 + 0,951j = 1,11 * e^{j1,03}$$

$$U(3) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(3T_d) - \frac{N}{2\pi} u(2T_d) = 0,951j = 0,951 * e^j$$

$$U(4) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(4T_d) - \frac{N}{2\pi} u(3T_d) = 1,01 + 0,588j = 1,16 * e^{j0,56}$$

$$U(5) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(5T_d) - \frac{N}{2\pi} u(4T_d) = -0,94$$

$$U(6) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(6T_d) - \frac{N}{2\pi} u(5T_d) = -0,93 - 0,588j = -1,1 * e^{j-0,56}$$

$$U(7) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(7T_d) - \frac{N}{2\pi} u(6T_d) = -0,57 - 0,951j = -1,11 * e^{j-1,03}$$

$$U(8) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(8T_d) - \frac{N}{2\pi} u(7T_d) = -0,951j = 0,951 * e^{-j}$$

$$U(9) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(9T_d) - \frac{N}{2\pi} u(8T_d) = 0,57 - 0,588j = 0,82 * e^{j-45,9}$$

$$U(10) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(10T_d) - \frac{N}{2\pi} u(9T_d) = 0,94$$

$$U(11) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(11T_d) - \frac{N}{2\pi} u(10T_d) = 0,93 + 0,588j = 1,1 * e^{j32,3}$$

Таким образом, погрешность вычисления модуля вектора напряжения неодинакова и достигает 18 %.

2.2 Расчет для $n=12$

На вход блока измерений ЦИО последовательно поступают цифровые отсчеты напряжения в аварийном режиме (согласно осциллограмме, на рисунке 5), представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Значения цифровых отсчетов для $u(t)$

$u(-2T_d)$	$u(-1T_d)$	$u(0)$	$u(1T_d)$	$u(2T_d)$	$u(3T_d)$	$u(4T_d)$
-0,866	-0,500	0,000	0,500	0,866	1,000	0,866
$u(5T_d)$	$u(6T_d)$	$u(7T_d)$	$u(8T_d)$	$u(9T_d)$	$u(10T_d)$	$u(11T_d)$
0,500	0,000	-0,500	-0,866	-1,000	-0,866	-0,500

Графики функций трех фаз напряжений $u(t)$ представлены на рисунке 5.

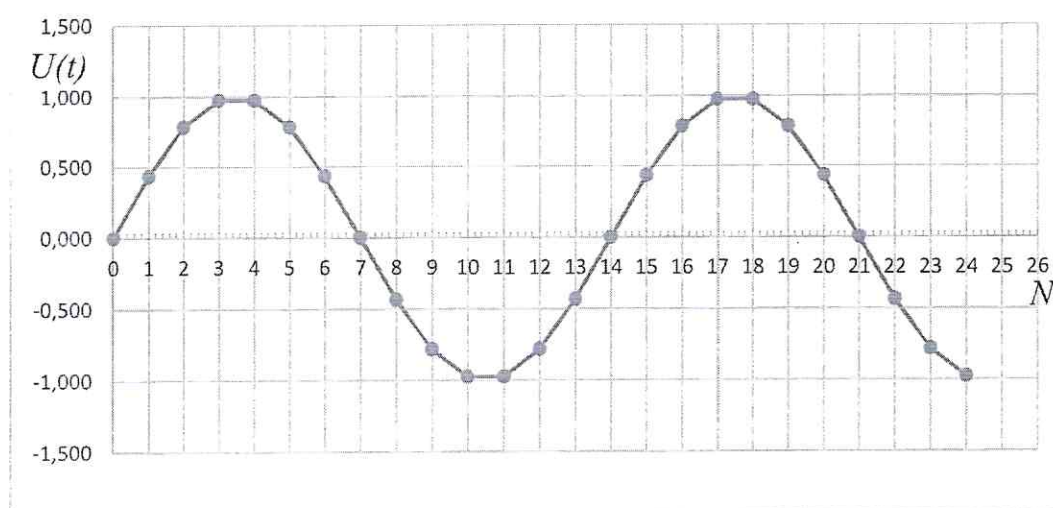


Рисунок 5 - Дискретизированные входные сигналы напряжения на входе ЦИО тока в аварийном режиме при $n=12$

Проведем расчет ЦИО:

$$U(1) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(T_d) - \frac{N}{2\pi} u(0) = 0,95 + 0,5j = 1,07 * e^{j27,75}$$

$$U(2) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(2T_d) - \frac{N}{2\pi} u(T_d) = 0,7 + 0,866j = 1,11 * e^{j51,05}$$

$$U(3) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(3T_d) - \frac{N}{2\pi} u(2T_d) = 0,26 + j = 1,03 * e^{j75,42}$$

$$U(4) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(4T_d) - \frac{N}{2\pi} u(3T_d) = -0,26 + 0,886j = 0,9 * e^{j-70,14}$$

$$U(5) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(5T_d) - \frac{N}{2\pi} u(4T_d) = -0,7 + 0,5j = 0,86 * e^{j-32,4}$$

$$U(6) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(6T_d) - \frac{N}{2\pi} u(5T_d) = -0,95$$

$$U(7) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(7T_d) - \frac{N}{2\pi} u(6T_d) = -0,95 - 0,5j = 1,07 * e^{j24,62}$$

$$U(8) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(8T_d) - \frac{N}{2\pi} u(7T_d) = -0,7 - 0,866j = 1,11 * e^{j47,9}$$

$$U(9) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(9T_d) - \frac{N}{2\pi} u(8T_d) = -0,26 - j = 1,03 * e^{j72,28}$$

$$U(10) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(10T_d) - \frac{N}{2\pi} u(9T_d) = 0,26 - 0,866j = 0,9 * e^{j-73,28}$$

$$U(11) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(11T_d) - \frac{N}{2\pi} u(10T_d) = 0,7 - 0,5j = 0,86 * e^{j-35,53}$$

Погрешность вычисления модуля вектора напряжения неодинакова и достигает 14 %.

2.3 Расчет для $n=14$

На вход блока измерений ЦИО последовательно поступают цифровые отсчеты напряжения в аварийном режиме (согласно осциллограмме, на рисунке 5), представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Значения цифровых отсчетов для $u(t)$

$u(-2T_d)$	$u(-1T_d)$	$u(0)$	$u(1T_d)$	$u(2T_d)$	$u(3T_d)$	$u(4T_d)$
-0,782	-0,434	0,000	0,434	0,782	0,975	0,975
$u(5T_d)$	$u(6T_d)$	$u(7T_d)$	$u(8T_d)$	$u(9T_d)$	$u(10T_d)$	$u(11T_d)$
0,782	0,434	0,000	-0,434	-0,782	-0,975	-0,975

6. Графики функций трех фаз напряжений $u(t)$ представлены на рисунке

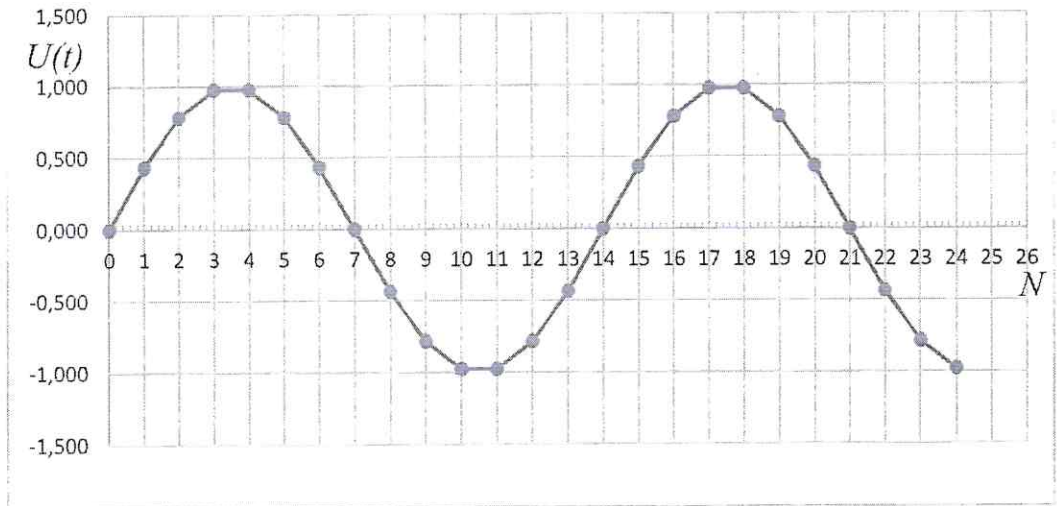


Рисунок 6 - Дискретизированные входные сигналы напряжения на входе ЦИО тока в аварийном режиме при $n=14$

Проведем расчет ЦИО:

$$U(1) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(T_d) - \frac{N}{2\pi} u(0) = 0,97 + 0,434j = 1,06 * e^{j24,1}$$

$$U(2) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(2T_d) - \frac{N}{2\pi} u(T_d) = 0,77 + 0,792j = 1,1 * e^{j45,8}$$

$$U(3) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(3T_d) - \frac{N}{2\pi} u(2T_d) = 0,43 + 0,975j = 1,06 * e^{j66,2}$$

$$U(4) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(4T_d) - \frac{N}{2\pi} u(3T_d) = 0,975j = 0,975 * e^j$$

$$U(5) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(5T_d) - \frac{N}{2\pi} u(4T_d) = -0,43 + 0,782j = 0,89 * e^{j-58,05}$$

$$U(6) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(6T_d) - \frac{N}{2\pi} u(5T_d) = -0,77 + 0,434j = 0,88 * e^{j-26,26}$$

$$U(7) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(7T_d) - \frac{N}{2\pi} u(6T_d) = -0,96$$

$$U(8) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(8T_d) - \frac{N}{2\pi} u(7T_d) = -0,96 - 0,434j = 1,05 * e^{j21,18}$$

$$U(9) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(9T_d) - \frac{N}{2\pi} u(8T_d) = -0,77 - 0,782j = 1,1 * e^{j42,66}$$

$$U(10) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(10T_d) - \frac{N}{2\pi} u(9T_d) = -0,43 - 0,975j = 1,06 * e^{j63,06}$$

$$U(11) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(11T_d) - \frac{N}{2\pi} u(10T_d) = -0,975j = 0,975 * e^j$$

Погрешность вычисления модуля вектора напряжения неодинакова и достигает 12 %.

2.4 Расчет для $n=16$

На вход блока измерений ЦИО последовательно поступают цифровые отсчёты напряжения в аварийном режиме (согласно осциллограмме, на рисунке 5), представленные в таблице 4.

Таблица 4 – Значения цифровых отсчетов для $u(t)$

$u(-2T_d)$	$u(-1T_d)$	$u(0)$	$u(1T_d)$	$u(2T_d)$	$u(3T_d)$	$u(4T_d)$
-0,707	-0,383	0,000	0,383	0,707	0,924	1,000
$u(5T_d)$	$u(6T_d)$	$u(7T_d)$	$u(8T_d)$	$u(9T_d)$	$u(10T_d)$	$u(11T_d)$
0,924	0,707	0,383	0,000	-0,383	-0,707	-0,924

7. Графики функций трех фаз напряжений $u(t)$ представлены на рисунке

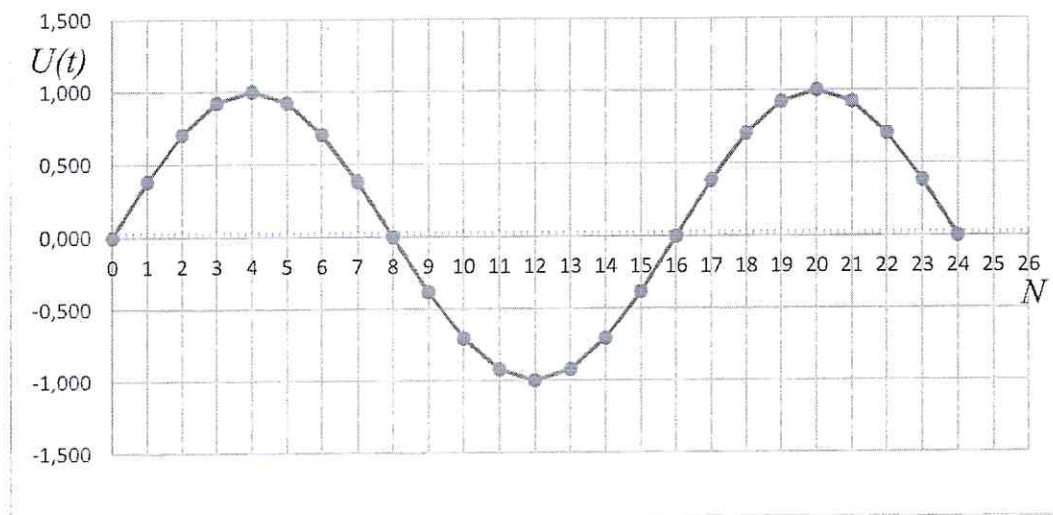


Рисунок 7 - Дискретизированные входные сигналы напряжения на входе ЦИО тока в аварийном режиме при $n=16$

Проведем расчет ЦИО:

$$U(1) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(T_d) - \frac{N}{2\pi} u(0) = 0,85 + 0,383j = 0,93 * e^{j24,25}$$

$$U(2) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(2T_d) - \frac{N}{2\pi} u(T_d) = 0,72 + 0,707j = 1,01 * e^{j44,47}$$

$$U(3) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(3T_d) - \frac{N}{2\pi} u(2T_d) = 0,48 + 0,924j = 1,05 * e^{j62,8}$$

$$U(4) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(4T_d) - \frac{N}{2\pi} u(3T_d) = 0,17 + j = 1,01 * e^{j80,35}$$

$$U(5) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(5T_d) - \frac{N}{2\pi} u(4T_d) = -0,17 + 0,924j = 0,94 * e^{j-76,43}$$

$$U(6) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(6T_d) - \frac{N}{2\pi} u(5T_d) = -0,48 + 0,707j = 0,95 * e^{j-52,68}$$

$$U(7) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(7T_d) - \frac{N}{2\pi} u(6T_d) = -0,82 + 0,383j = 0,91 * e^{j-21,89}$$

$$U(8) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(8T_d) - \frac{N}{2\pi} u(7T_d) = -0,97$$

$$U(9) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(9T_d) - \frac{N}{2\pi} u(8T_d) = -0,97 - 0,383j = 1,04 * e^{j18,40}$$

$$U(10) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(10T_d) - \frac{N}{2\pi} u(9T_d) = -0,82 - 0,707j = 1,08 * e^{j37,62}$$

$$U(11) = \left(\frac{N}{2\pi} + j\right) u(11T_d) - \frac{N}{2\pi} u(10T_d) = -0,55 - 0,924j = 1,04 * e^{j86,82}$$

Погрешность вычисления модуля вектора напряжения неодинакова и достигает 9 %.

3. Расчет графических характеристик ЦИО

Расчеты частотных характеристик ЦИО для алгоритма на основе вычисления мгновенных значений приведены в приложении А (расчет для $n = 12$). Сами характеристики представлены на рисунках А1- А3.

Как видно из характеристики комплексность коэффициентов импульсной характеристики ЦИО проявляется появлением двух дополнительных АЧХ $A1(\omega)$ и $A2(\omega)$, которые определяются полусуммой и полуразностью значений двух основных АЧХ $H(\omega)$ и $H(-\omega)$. Результирующий сигнал является действительной дискретизированной синусоидальной функцией.

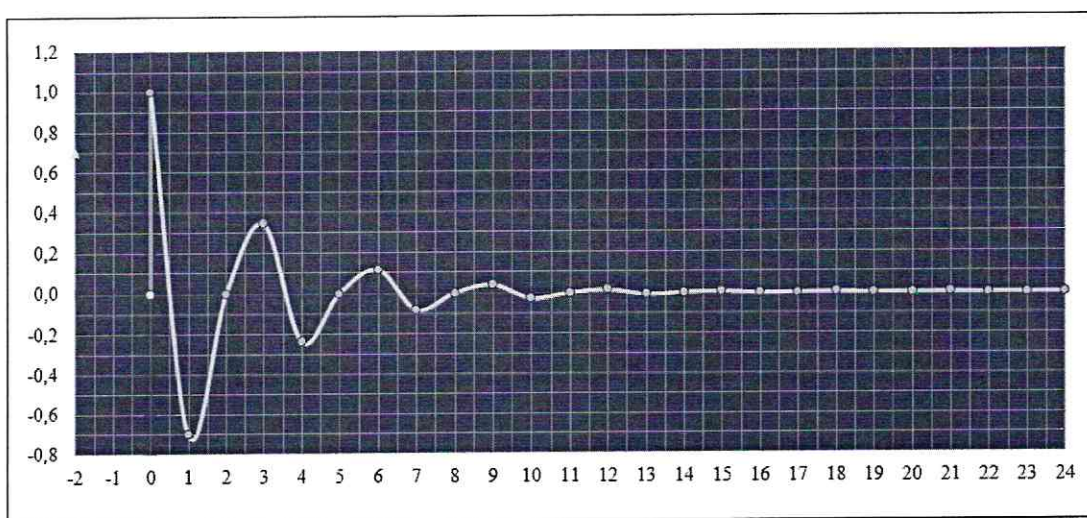


Рисунок 8 - Импульсная характеристика при $n = 12$

Заключение

В современном мире цифровая релейная защита является одним из главных элементов надежной работы энергосистемы. Существенными преимуществами обладают цифровые устройства. С каждым годом увеличивается количество современных устройств релейной защиты на электростанциях и подстанциях. Основное преимущество микропроцессорных устройств защиты – это их многофункциональность. Помимо основных функций, а именно реализации защиты оборудования и работы автоматических устройств, цифровые устройства осуществляют замер электрических величин для передачи на дисплей или на пункт управления. Точность измерений также имеет высокие показатели. Недостатками данных устройств является высокая стоимость и уязвимость к электромагнитным помехам.

С увеличением числа разрядности АЦП увеличивается точность ЦИО и остальных алгоритмов, но стоит учитывать и погрешности самих вычислительных алгоритмов.

Характеристика и точность реле позволяет исключать ложные срабатывания реле и увеличивает надежность работы системы релейной защиты.

В ходе работы ознакомились структурой, принципом работы и основными характеристиками и параметрами цифрового реле максимального напряжения мгновенными значениями. Рассчитали параметры цифрового реле, построили графики характеризующие работу цифрового реле. Все полученные знания в данной работе будут полезны при работе с устройствами цифровой релейной защиты.

Список использованных источников

1. Никитин, А.А. Аппараты релейной защиты: учеб. пособие/А.А. Никитин, Э.М. Шнеерсон. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2008. – 524 с.
2. Никитин, А.А. Микропроцессорные реле: учеб. пособие/А.А. Никитин. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. 2006. – 448 с.
3. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М: Энергоатомиздат. 2007. – 549 с.
4. Дьяченко М.Д. Цифровая защита (аппаратное и программное обеспечение): учеб. пособие. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2014. – 304 с.
5. Никитин, А.А. Цифровая релейная защита. Основы синтеза измерительной части микропроцессорных реле: текст лекций. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. 2014. – 240 с.

Приложение А

Частотные характеристики ЦНО

q	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0
$\sin(2q\pi/N)$	0,000	0,500	0,866	1,000	0,866	0,500	0,000	-0,500	-0,866	-1,000	-0,866	-0,500	0,000	0,500	0,866	1,000	0,866	0,500	0,000	-0,500	-0,866	-1,000	-0,866	-0,500	0,000
$\cos(2q\pi/N)$	1,000	0,87	0,50	0,00	-0,50	-0,87	-1,00	-0,87	-0,50	0,00	0,50	0,87	1,00	0,87	0,50	0,00	-0,50	-0,87	-1,00	-0,87	-0,50	0,00	0,50	0,87	1,00
$\cos(2q\pi/N)$	0,00	0,26	0,95	1,91	2,86	3,56	3,82	3,56	2,86	1,91	0,95	0,26	0,00	0,26	0,95	1,91	2,86	3,56	3,82	3,56	2,86	1,91	0,95	0,26	0,00
$\sin(2q\pi/N)^*$	1,00	1,95	2,65	2,91	2,65	1,95	1,00	0,05	-0,65	-0,91	-0,65	0,05	1,00	1,95	2,65	2,91	2,65	1,95	1,00	0,05	-0,65	-0,91	-0,65	0,05	1,00
$H(\omega)$	1,00	1,97	2,82	3,48	3,91	4,06	3,95	3,56	2,94	2,12	1,16	0,26	1,00	1,97	2,82	3,48	3,91	4,06	3,95	3,56	2,94	2,12	1,16	0,26	1,00
$\beta(\omega)$	1,57	1,44	1,23	0,99	0,75	0,50	0,26	0,01	-0,22	-0,44	-0,60	0,17	1,57	1,44	1,23	0,99	0,75	0,50	0,26	0,01	-0,22	-0,44	-0,60	0,17	1,57
$\beta(\omega), \text{grad}$	90,0	82,5	70,2	56,7	42,8	28,7	14,7	0,7	-12,9	-25,5	-34,4	10,0	90,0	82,5	70,2	56,7	42,8	28,7	14,7	0,7	-12,9	-25,5	-34,4	10,0	90,0
$a(-\omega)$	0,00	0,26	0,95	1,91	2,86	3,56	3,82	3,56	2,86	1,91	0,95	0,26	0,00	0,26	0,95	1,91	2,86	3,56	3,82	3,56	2,86	1,91	0,95	0,26	0,00
$b(-\omega)$	1,00	0,05	-0,65	-0,91	-0,65	0,05	1,00	1,95	2,65	2,91	2,65	1,95	1,00	0,05	-0,65	-0,91	-0,65	0,05	1,00	1,95	2,65	2,91	2,65	1,95	1,00
$H(-\omega)$	1,00	0,26	1,16	2,12	2,94	3,56	3,95	4,06	3,91	3,48	2,82	1,97	1,00	0,26	1,16	2,12	2,94	3,56	3,95	4,06	3,91	3,48	2,82	1,97	1,00
$\beta(-\omega)$	1,57	0,17	-0,60	-0,44	-0,22	0,01	0,26	0,50	0,75	0,99	1,23	1,44	1,57	0,17	-0,60	-0,44	-0,22	0,01	0,26	0,50	0,75	0,99	1,23	1,44	1,57
$B(-\omega), \text{grad}$	90,0	10,0	-34,4	-25,5	-12,9	0,7	14,7	28,7	42,8	56,7	70,2	82,5	90,0	10,0	-34,4	-25,5	-12,9	0,7	14,7	28,7	42,8	56,7	70,2	82,5	90,0
$A(\omega)$	1,00	1,12	1,99	2,80	3,42	3,81	3,95	3,81	3,42	2,80	1,989	1,12	1,00	1,12	1,99	2,80	3,42	3,81	3,95	3,81	3,42	2,80	1,99	1,12	1,00
$-A(\omega)$	0,00	0,86	0,83	0,68	0,48	0,25	0,00	0,25	0,48	0,68	0,832	0,86	0,00	0,86	0,83	0,68	0,48	0,25	0,00	0,25	0,48	0,68	0,83	0,86	0,00

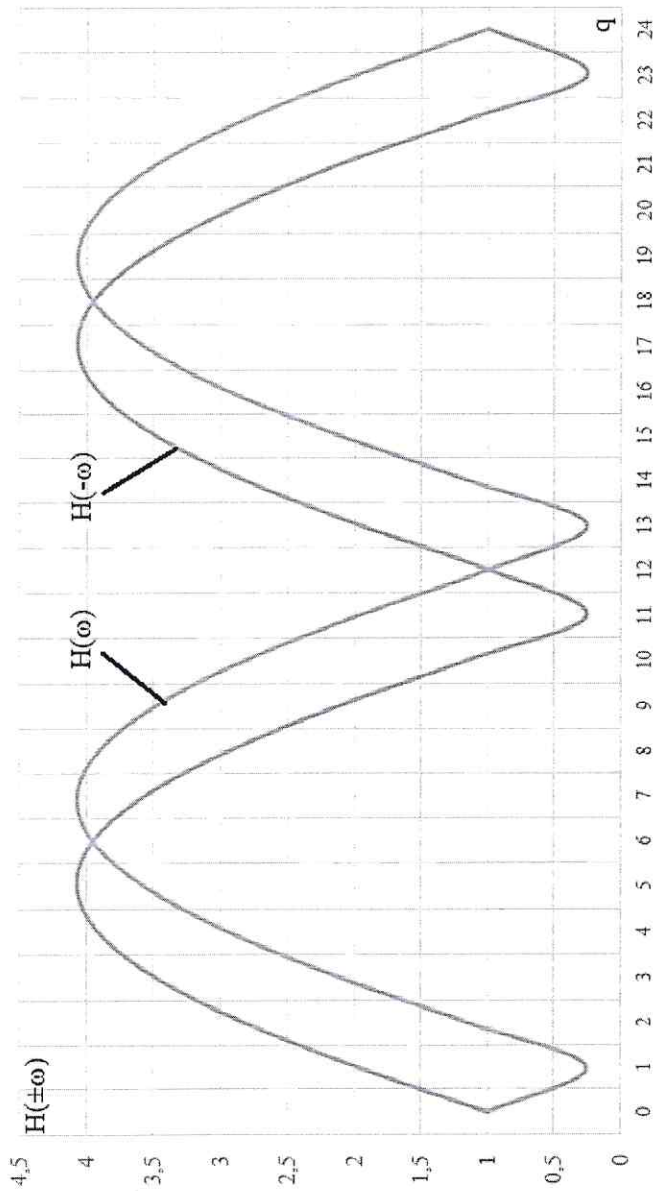


Рисунок А1 - АЧХ $H(\pm\omega)$ алгоритма

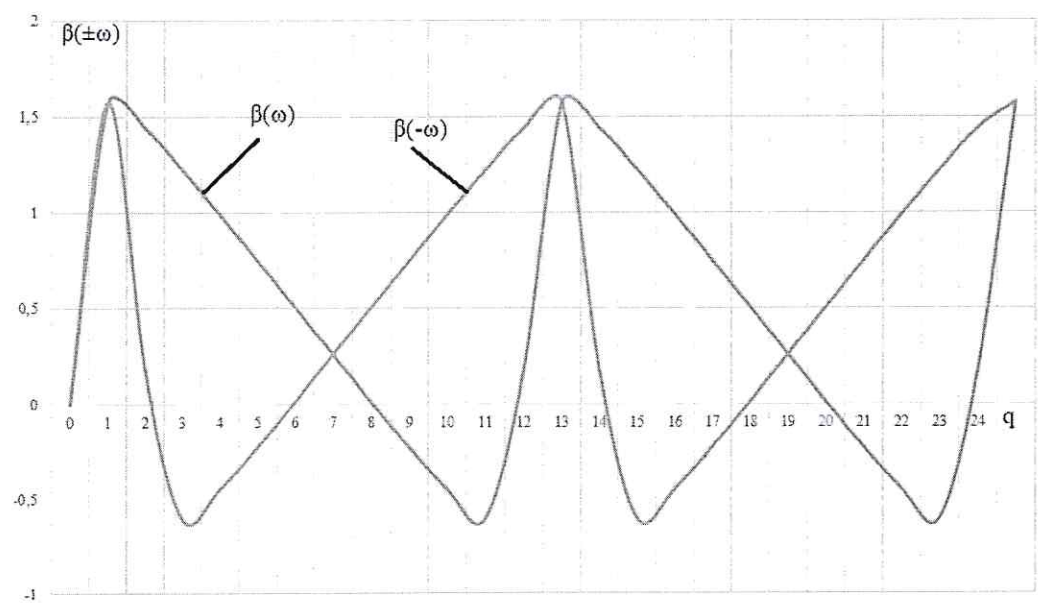


Рисунок А2– 10 ФЧХ $\beta(\pm\omega)$ алгоритма

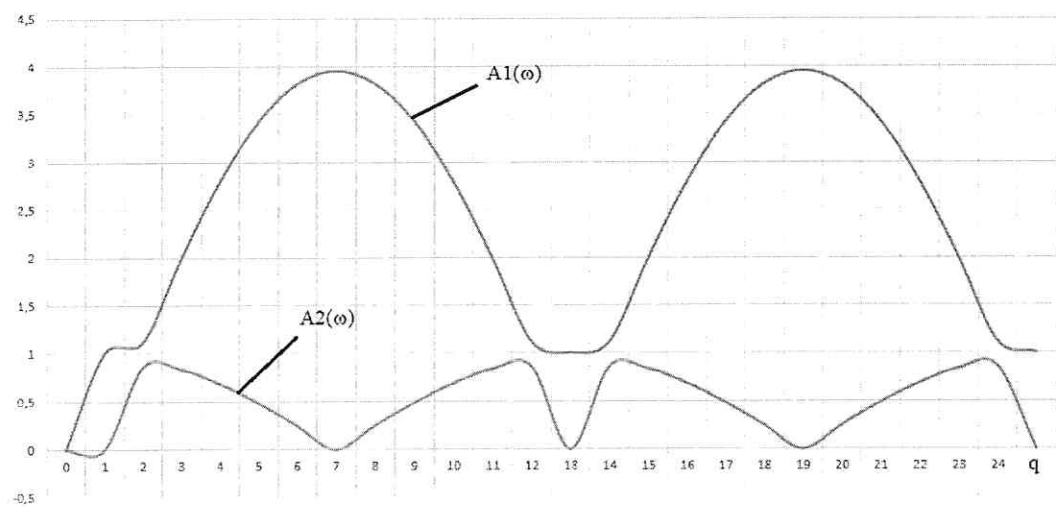


Рисунок – А3 Частотные характеристики $A1(q)$ и $A2(q)$ алгоритма