

УДК 621.316.925.45

## ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ КОРРЕКЦИИ ИНТЕРВАЛА ДИСКРЕТИЗАЦИИ НА ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА КВАЗИЧАСТОТНОНЕЗАВИСИМЫХ АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Доктора техн. наук, профессора **НОВАШ В. И.**, **РОМАНЮК Ф. А.**,  
инженеры **ШМЫГИН В. В.**, **РОЖДЕСТВЕНСКИЙ А. В.**

*Белорусский национальный технический университет*

Измерительный орган (ИО) сопротивления в цифровых устройствах релейной защиты – структурный блок в алгоритме (программе) функционирования защиты, вырабатывающий сигнал о положении вектора сопротивления защищаемого объекта на его выходе (входное сопротивление) относительно области срабатывания. В современных дистанционных защитах ИО сопротивления вырабатывает также величины активной и реактивной составляющих входного сопротивления, позволяющие определить расстояние до места короткого замыкания (КЗ).

Информацией для работы ИО сопротивления являются цифровые последовательности выборок мгновенных значений тока и напряжения на входе защиты. Алгоритмы функционирования ИО сопротивления различаются вариантами математических операций с выборками мгновенных значений. Алгоритм «двух выборок» [1, 2], основанный на использовании двух смежных выборок тока и напряжения защищаемого объекта, алгоритм «ортогональных составляющих», использующий выборки мгновенных значений тока и напряжения на протяжении периода их изменения, содержит в качестве одного из информационных параметров длительность интервала времени между смежными выборками  $\Delta t$  – интервал дискретизации. В этих алгоритмах при  $\Delta t = \text{const}$  входные сопротивления получаются зависимыми от частоты сигналов.

Частотная независимость результатов определения входных сопротивлений обеспечивается коррекцией интервала дискретизации. Реактивные составляющие входных сопротивлений при наличии коррекции определяются величинами, соответствующими значениям частоты, т. е. заниженными при  $f < 50$  Гц и завышенными при  $f > 50$  Гц. Пересчет реактивных сопротивлений к частоте 50 Гц можно ввести в алгоритм функционирования ИО и таким образом сделать его частотнонезависимым. В дальнейшем такие алгоритмы называются квазичастотнонезависимыми (от *quasi* – как бы, почти) – КЧНЗ алгоритмами.

Алгоритм «трех выборок» [3], основанный на математической модели линии в виде дифференциального уравнения мгновенных значений, является практически частотнонезависимым. Погрешности входных сопротивлений линии без поперечных связей в установившихся режимах КЗ с частотами 45...55 Гц не превышает 1...2 %.

Алгоритм ИО сопротивления на основе дифференциального уравнения линии с  $L$ - $R$  параметрами, связывающего векторы напряжения, тока и производной тока:

$$\dot{U} = R_{\text{вх}} \dot{I} + L_{\text{вх}} \frac{d}{dt} \dot{I} = R_{\text{вх}} \dot{I} + L_{\text{вх}} \dot{I}', \quad (1)$$

может быть выполнен квазичастотнонезависимым, если ортогональные составляющие векторов  $\dot{U}$ ,  $\dot{I}$ ,  $\dot{I}'$  определять с частотной коррекцией интервала дискретизации этих сигналов.

Мгновенное значение производной тока в момент времени  $t$

$$i' = \frac{i(\tau) - i(t - \Delta\tau)}{\Delta\tau} = \frac{\Delta i}{\Delta\tau},$$

где  $\Delta i$  – изменение тока на интервале времени  $\Delta\tau$ .

Ортогональные составляющие производной тока:

$$i'_{cs} = \frac{(\Delta i)_{cs}}{\Delta\tau}; \quad i'_{sn} = \frac{(\Delta i)_{sn}}{\Delta\tau}.$$

Ортогональные составляющие тока, напряжения, производной тока определяются по выражениям, приведенным в [3], с интервалом дискретизации  $\Delta t = \Delta t_0 \frac{50}{f}$ . Интервал времени для производной тока  $\Delta\tau$  может принимать

диапазон  $\Delta\tau = 0,5...2$  мс независимо от частоты. Сравнительно простой алгоритм вычисления  $R_{\text{вх}}$ ,  $X_{\text{вх}}$  получается при  $\Delta t = 4$  мс;  $\Delta\tau = 1/4\Delta t$ .

Перейдя в (1) к ортогональным составляющим векторов напряжения  $\dot{U} = u_{cs} + j u_{sn}$ , тока  $\dot{I} = i_{cs} + j i_{sn}$  и вектора производной тока  $\dot{I}' = i'_{cs} + j i'_{sn}$ , получим два уравнения:

$$u_{cs} = R_{\text{вх}} i_{cs} + L_{\text{вх}} i'_{cs};$$

$$u_{sn} = R_{\text{вх}} i_{sn} + L_{\text{вх}} i'_{sn}.$$

Решив эту систему уравнений относительно  $R_{\text{вх}}$ ,  $L_{\text{вх}}$ , получим:

$$R_{\text{вх}} = \frac{u_{sn} i'_{cs} - u_{cs} i'_{sn}}{i_{sn} i'_{cs} - i_{cs} i'_{sn}}; \quad (2)$$

$$X_{\text{вх}} = \frac{u_{cs} i_{sn} - u_{sn} i_{cs}}{i_{sn} i'_{cs} - i_{cs} i'_{sn}} \omega \frac{50}{f}. \quad (3)$$

Для оценки влияния погрешности задания и исполнения интервала дискретизации величина  $\Delta t$  в КЧНЗ алгоритмах рассматривается как сумма двух составляющих

$$\Delta t = \Delta t_0 + \delta_f. \quad (4)$$

Здесь  $\Delta t_0$  – интервал дискретизации при частоте  $f_0 = 50$  Гц;  $\delta_f$  – частотная коррекция интервала дискретизации.

Величина частотной коррекции из этого выражения

$$\delta_f = \Delta t_0 \left( \frac{f_0}{f} - 1 \right) = \Delta t_0 \Delta f_*, \quad (5)$$

где  $\Delta f_* = \frac{f_0 - f}{f}$  – относительное отклонение частоты от номинального значения.

Для количественной оценки влияния погрешности в задании величины  $\delta_f$  выражение (4) представляется в следующем виде:

$$\Delta t = \Delta t_0 + (1 + k_*) \delta_f.$$

Величина  $k_*$  в этом выражении – относительная ошибка задания (исполнения) частотной коррекции интервала дискретизации. С учетом [5] интервал дискретизации в алгоритмах функционирования ИО сопротивления задается выражением

$$\Delta t = \Delta t_0 [1 + (1 + k_*) \Delta f_*]. \quad (6)$$

Ошибка в задании самой величины  $\Delta t$  согласно (6) равна примерно  $k_* \Delta f_0$ , что при максимальных отклонениях частоты  $\pm 10\%$  составляет около  $\pm 0,1k_*$ . Отсутствие ошибки частотной коррекции задается величиной  $k_* = 0$ , отсутствие коррекции ( $\delta_f = 0$ ) соответствует  $k_* = -1$ .

Исследование влияния ошибки частотной коррекции интервала дискретизации проводилось с использованием варианта компьютерной программы, описанной в [4].

Назначением программы являются проверка и корректировка параметров срабатывания, оценка селективности, чувствительности, защитоспособности дистанционных защит распределителей 6–10–35–110 кВ методом вычислительного эксперимента. Программа воспроизводит расчеты мгновенных значений токов и напряжений всех видов междуфазных КЗ в распределительной сети, схема которой представлена на рис. 1. Расчеты выполняются с учетом активных сопротивлений всех элементов схемы, переходного сопротивления в месте КЗ, активно-индуктивных нагрузок в узлах сети. Линии электропередачи представлены  $L$ – $R$  параметрами без учета поперечных емкостей. Все элементы схемы рис. 1 представлены в трехфазном исполнении и описаны обыкновенными дифференциальными уравнениями [5]. Предусмотрена возможность выполнения расчетов при частоте источников питания систем, отличающихся от номинальной. Все исходные данные для расчета, включая вид и место КЗ, содержатся в заранее подготовленном внешнем файле. Расстояние до места КЗ и переходное сопротивление в месте КЗ могут быть изменены в диалоговом режиме без выхода из программы.

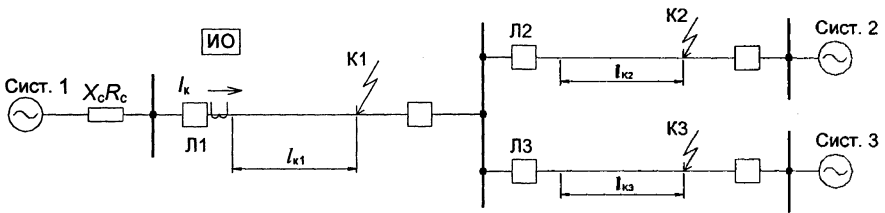


Рис. 1

Результаты работы программы выдаются на экран дисплея в темпе расчета. Входные сопротивления выводятся в виде годографов векторов  $\underline{Z}_{AB}$ ,  $\underline{Z}_{BC}$ ,  $\underline{Z}_{CA}$  на комплексной плоскости в прямоугольной системе координат  $R_p$ ,  $X_p$  в заданном масштабе. Действующие значения токов и напряжений защищаемой линии, погрешности активной и реактивной составляющих входного сопротивления и некоторые другие параметры исследуемого режима выдаются на экран в численном виде.

Программы предназначены для оценки технического совершенства дистанционной защиты линии Л1. К ИО сопротивления этой защиты подводятся вторичные токи трансформаторов тока (ТТ) линии Л1 и вторичные напряжения трансформаторов напряжения (ТН) в начале линии Л1. В алгоритме программы содержатся математические модели ТТ и ТН, позволяющие определять и учитывать вносимые ими искажения вторичных сигналов. Количественные результаты, приводимые ниже, получены без учета этих искажений.

Влияние ошибки частотной коррекции на алгоритм функционирования ИО сопротивления (2), (3) и алгоритмы, рассмотренные в [3], оценивались погрешностями входных сопротивлений при отклонениях частоты:

$$\Delta R_{вх} = \frac{R_{вх} - R_{вх,расч}}{R_{вх}} \cdot 100 \% ; \quad (7)$$

$$\Delta X_{вх} = \frac{X_{вх} - X_{вх,расч}}{X_{вх}} \cdot 100 \% . \quad (8)$$

В этих зависимостях  $R_{вх,расч}$ ,  $X_{вх,расч}$  – расчетные значения входных сопротивлений, определяемые в зависимости от места КЗ, наличия и величины переходного сопротивления следующим образом: при КЗ на линии Л1:

$$R_{вх,расч} = l_k \cdot R_{Л1уд} + 0,5 R_d ;$$

$$X_{вх,расч} = l_k \cdot X_{Л1уд} .$$

Здесь  $l_k$  – расстояние от места установки защиты до места КЗ;  $R_{Л1уд}$ ,  $X_{Л1уд}$  – удельные сопротивления линии Л1;  $R_d$  – переходное сопротивление в месте КЗ.

При КЗ на линиях Л2 и Л3 расчетные значения входных сопротивлений определяются как суммы аналогичных выражений для линии Л2 или Л3 и сопротивлений линии Л1. Расчеты выполнялись без учета подпитки с противоположной стороны, поэтому в выражениях  $R_{вх,расч}$ ,  $X_{вх,расч}$  эта подпитка не учитывалась.

Величины  $R_{ср}$ ,  $X_{ср}$  – сопротивления срабатывания той ступени защиты, в зоне действия которой происходит короткое замыкание.

Исследования влияния ошибки частотной поправки интервала дискретизации проводились с использованием выражения (6) для задания интервала дискретизации. Относительная ошибка принималась в диапазоне  $k_* = \pm(0...1)$ , что соответствует ошибке в заданном диапазоне интервала дискретизации до  $\pm 10\%$ . Современные вычислительные средства, используемые в аппаратном исполнении дистанционных защит, обеспечивают более высокую точность задания интервала дискретизации при отклонениях частоты.

Наиболее чувствительными к ошибке задания частотной коррекции являются КЧНЗ алгоритмы двух выборок и ортогональных составляющих. Наличие такой ошибки вызывает возрастание погрешностей  $R_{вх}$ ,  $X_{вх}$  по абсолютным значениям и придает им колебательный знакопеременный характер. На рис. 2, 3 представлены результаты расчетов по алгоритму ортогональных составляющих режимов трехфазного КЗ в III зоне дистанционной защиты при  $k_* = 1$  и  $k_* = 0,5$ . При  $k_* = 0,4...0,5$  погрешности реактивной составляющей входного сопротивления в диапазоне частот 45...55 Гц достигают 8...10%. Аналогичные расчеты, выполненные для КЗ в I и II зонах защиты, показали, что максимальные по абсолютному значению погрешности реактивной составляющей входного сопротивления составляют 6...8%. Максимальные по абсолютному значению погрешности активной составляющей входного сопротивления носят положительный характер и в 1,5...2 раза больше погрешностей реактивной составляющей. Такие же результаты получены для алгоритма «двух выборок».

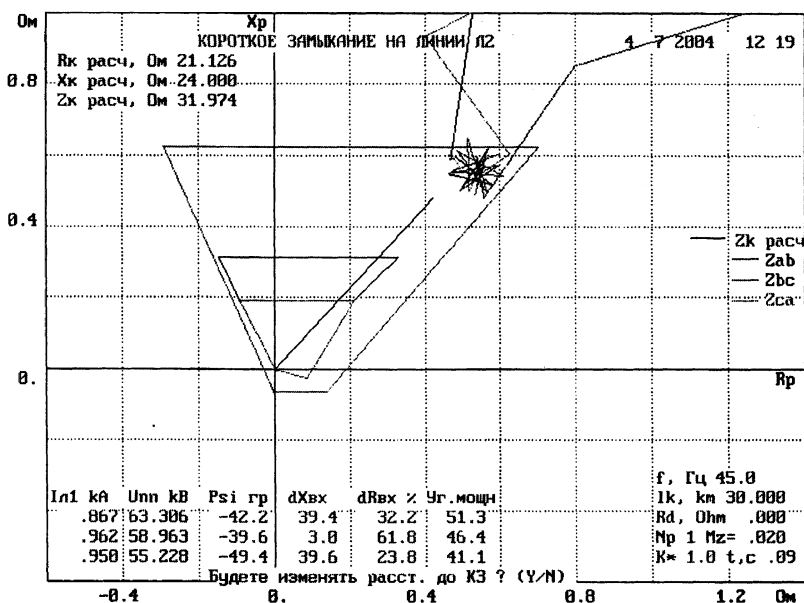


Рис. 2

При  $k_* = 0,2...0,3$  погрешности входных сопротивлений в диапазоне частот 45...55 Гц не превышают 6...8%. Значениям  $k_* = 1$  и  $\Delta f_*$  соответствует допустимая погрешность задания величины интервала дискретизации 2...3%, необходимая для того, чтобы алгоритмы ортогональных составляющих и двух выборок при наличии частотной коррекции были практически частотнезависимыми.

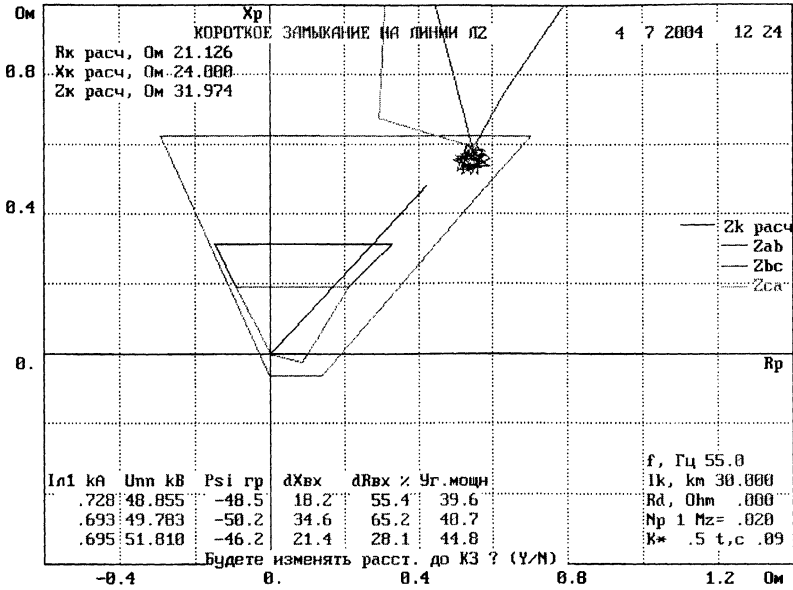


Рис. 3

Алгоритмы, основанные на математической модели линии, алгоритм «трех выборок», рассмотренный выше алгоритм, основанный на модели линии в комплексной форме, являются практически частотнонезависимыми и поэтому не нуждаются в частотной коррекции интервала дискретизации. На рис. 4, 5 приведены результаты расчетов при  $k^* = -1$  трехфазного КЗ в III зоне защиты (алгоритм, основанный на модели линии в комплексной форме). Погрешности реактивной составляющей входного сопротивления не превышают 3...5%. Достоинством алгоритма (2), (3) является наличие в его составе преобразования Фурье, что при большом количестве выборок мгновенных значений на периоде позволяет исключить из аналоговой части защиты фильтры низких частот на операционных усилителях.

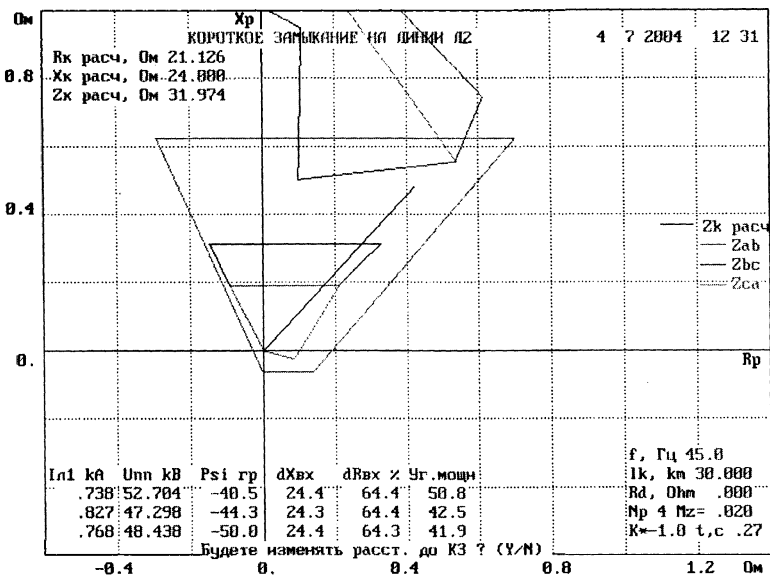


Рис. 4

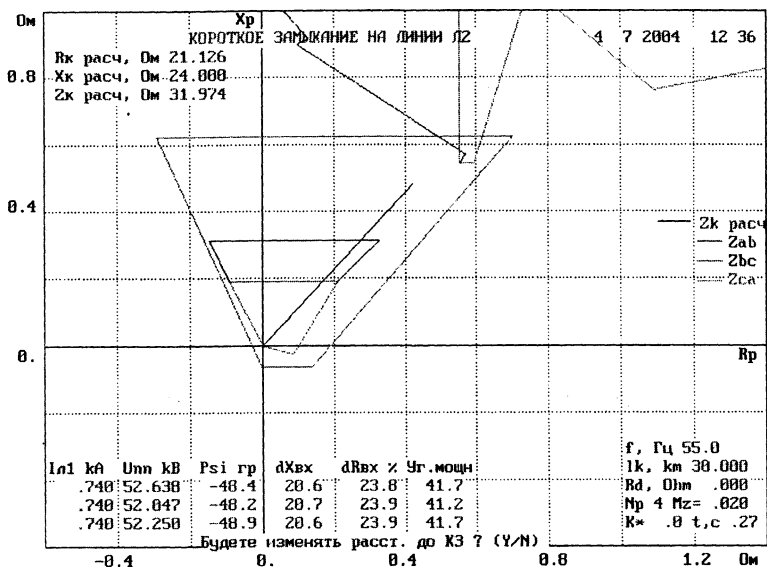


Рис. 5

## ВЫВОДЫ

1. Алгоритмы ортогональных составляющих и двух выборок при погрешностях частотной коррекции интервала дискретизации входных сигналов, не превышающих 2...3 %, являются практически частотнонезависимыми. Погрешности определения входных сопротивлений при этом не выходят за пределы, считающиеся допустимыми при расчете параметров срабатывания дистанционных защит.

2. Алгоритм определения входных сопротивлений ИО сопротивления, основанный на математической модели линии с  $L-R$  параметрами, является практически частотнонезависимым и может использоваться без частотной коррекции интервала дискретизации. Применение такой коррекции возможно, если в алгоритме предусмотрен расчет токов защищаемого объекта.

3. Компьютерная программа, использовавшаяся при исследовании частотных свойств ИО сопротивления, может быть применена в проектно-исследовательских организациях, производственных службах энергетических предприятий для уточненного выбора параметров срабатывания, оценки селективности, чувствительности, защитоспособности дистанционных защит распределительных сетей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
2. Шнейерсон Э. М. Дистанционные защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
3. Новаш В. И., Шмыгин В. В. Частотные свойства алгоритмов функционирования измерительных органов сопротивления цифровых дистанционных защит ЛЭП // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 5. – С. 15–23.
4. Информационное и математическое обеспечение вычислительного эксперимента в исследовании цифровых измерительных органов дистанционных защит линий 6–10–35 кВ / Ф. А. Романюк, Н. Н. Бобко, Е. В. Глинский и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 2. – С. 3–11.
5. Романюк Ф. А., Новаш В. И. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. – 174 с.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 9.07.2004