

Авторы:
 к.т.н. Мальный А.П.,
 к.т.н. Дони Н.А.,
 к.т.н. Шурупов А.А.,
 ООО НПП «ЭКРА»,
 г. Чебоксары, Россия.

РАСЧЕТ УСТАВКИ БЛОКИРОВКИ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ КАЧАНИЯХ ПО СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ

УДК 621.316.925

CALCULATION OF POWER SWING BLOCKING SETTING BASED ON IMPEDANCE RATE-OF-CHANGE FOR DISTANCE PROTECTION FUNCTION

Аннотация: рассмотрена структура блокировки дистанционной защиты при качаниях по скорости изменения сопротивления, характеристики её измерительного органа, и выведена формула для практического расчёта его уставки по времени.

Ключевые слова: дистанционная защита, блокировка при качаниях, расчёт уставки.

Annotation:

The article discusses the algorithm of power swing blocking based on impedance rate-of-change used for distance protection. The shape of the measuring function characteristic with the practical formula for characteristic time setting are also presented.

Keywords:

distance protection, power swing blocking, setting calculation.

В статье приводится вывод формулы для практического расчёта уставки блокировки дистанционной защиты (ДЗ) при качаниях по скорости изменения сопротивления ($\Delta Z/\Delta t$) на входе защиты (далее в тексте обозначенной БК). В формуле используются только параметры эквивалентной схемы сети и характеристики реле сопротивления.

Блокировка при качаниях различает короткие замыкания (КЗ) от качаний и асинхронного режима по скорости изменения сопротивления Z на входе защиты.

Функциональная схема БК содержит (рис. 1): измерительный орган (ИО) блокировки – ИО dZ/dt , реле тока обратной последовательности РТ I₂ БКз, две выдержки времени DT1, DT2 и триггер ТГ.

Измерение скорости изменения сопротивления Z основано на сравнении времени прохождения годографом Z области между внешней и внутренней характеристиками срабатывания ИО dZ/dt с заданным значением времени DT1 – искомой уставкой.

При возникновении КЗ годограф Z скачкообразно переходит из области нагрузки в

область внутренней характеристики срабатывания измерительного органа БК. В случае возникновения синхронных качаний или в асинхронном режиме годограф Z заходит во внутреннюю область срабатывания с меньшей скоростью, и БК выдаёт запрет на срабатывание быстродействующих ступеней ДЗ.

В качестве внутренней характеристики срабатывания ИО dZ/dt в устройствах дистанционных защит производства НПП «ЭКРА» выбирается ненаправленная характеристика реле сопротивления (РС) третьей ступени ДЗ от междуфазных КЗ (или второй ступени, если третья ступень в защите не используется).

Внешняя характеристика срабатывания ИО dZ/dt отстоит от внутренней характеристики на ΔR по оси R и ΔX по оси X ($\Delta R_{уст}$ и $\Delta X_{уст}$), которые равны 1 Ом для номинального тока $I_{НОМ}$, равного 5 А, и 5 Ом для $I_{НОМ}$, равного 1 А.

Симметричность изменения Z по всем трём фазам контролируется с помощью трёх междуфазных реле сопротивления в составе ИО dZ/dt , выходы которых объединены логической схемой «И». Благодаря этому бло-



Мальный Альберт Петрович
 В 1958 г. окончил МЭИ, кандидат технических наук (НПИ, 1988 г.), старший научный сотрудник. Ведущий инженер ООО НПП «ЭКРА».

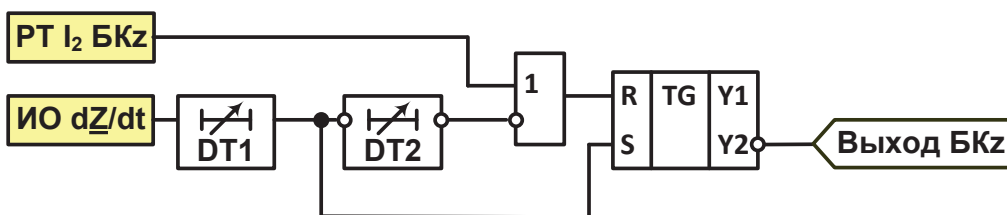


Рис. 1. Функциональная схема БК по скорости изменения сопротивления

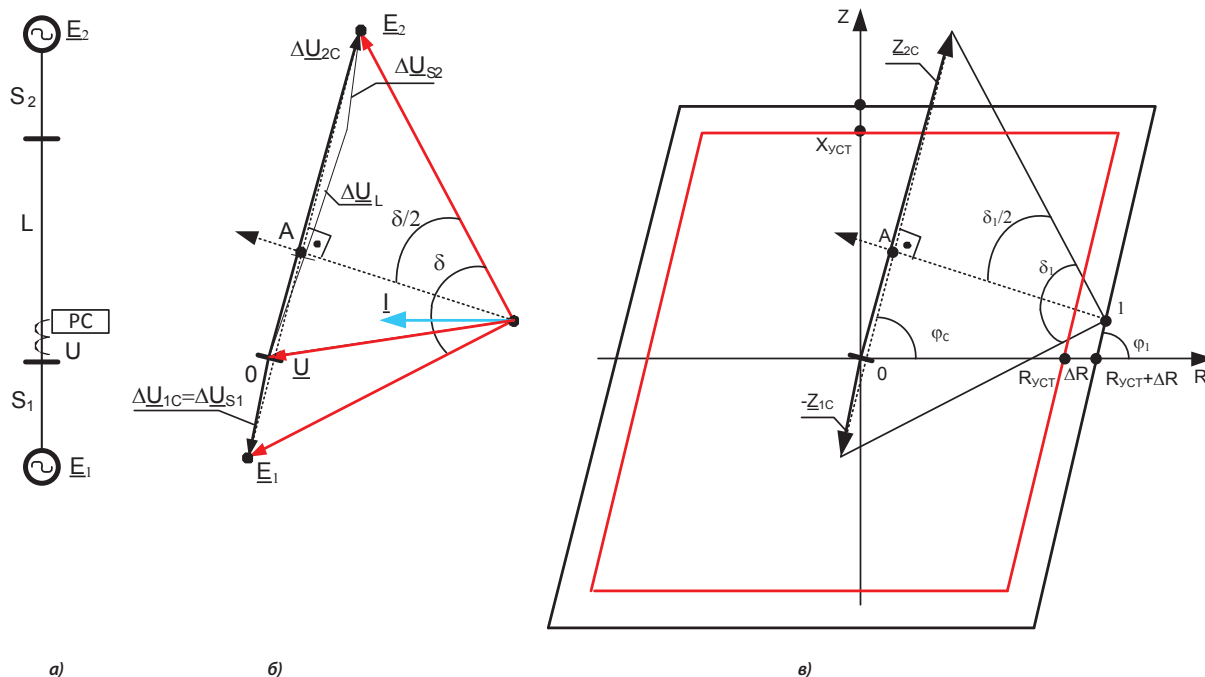


Рис. 2. Эквивалентная схема сети (а), диаграмма токов и напряжений (б) и характеристики РС БК (в)

кировка ДЗ осуществляется только в симметричных режимах, к которым относятся качания и асинхронный режим.

В соответствии с функциональной схемой (рис. 1), блокировка при качаниях работает следующим образом.

Сигнал логическая единица «1» на выходе ИО dZ/dt устанавливается при нахождении сопротивления Z в промежутке между внешней и внутренней характеристиками, в остальной части плоскости Z этот сигнал равен «0». В рабочем режиме нагрузки сопротивление Z находится снаружи внешней характеристики, и на выходах ИО dZ/dt , выдержек времени DT1, DT2, а также на входе S триггера TG сигналы равны «0». На инверсном выходе триггера TG – (на «Выходе БКз») при этом устанавливается сигнал «1», разрешающий действие ДЗ (блокирование отсутствует).

При коротком замыкании сопротивление Z за время, меньшее DT1, переходит из области вне внешней характеристики ИО dZ/dt внутрь внутренней характеристики, сигнал

на выходе DT1 не успевает измениться, и БК по-прежнему разрешает действие ДЗ.

В режиме качаний и в асинхронном режиме годограф Z попадает в область между внешней и внутренней характеристиками и продолжает находиться там и по истечении выдержки времени DT1. Сигнал «1» на выходе DT1 устанавливает на выходе «Y2» триггера TG сигнал «0», блокирующий срабатывание ДЗ. Через выдержку времени DT2 триггер возвращается в исходное состояние, и блокировка снимается.

В случае возникновения несимметричного КЗ на фоне качаний срабатывает реле тока обратной последовательности «РТ I₂ БКз», реагирующее на отношение модулей токов обратной и прямой последовательности, и триггер TG также возвращается в исходное состояние.

Выдержка времени DT1 является искомой уставкой БК по скорости изменения сопротивления.

Рассмотрим эквивалентную схему сети на рис. 2, а, которая состоит из системы S_1 с эквивалентной э.д.с.

E_1 и сопротивлением Z_{1c} (предвключенная часть общей системы) и расположенных в прямом направлении (относительно места установки защиты) линии L и системы S_2 с э.д.с. E_2 и сопротивлением Z_{2c} , включающим сопротивление линии и системы S_1 .

Дистанционная защита установлена в начале линии L со стороны системы.

На диаграмме токов и напряжений (рис. 2,б) ток I и напряжение U в месте установки защиты изображены в произвольный момент времени, когда угол между E_1 и E_2 равен δ . Значение тока I принято действительным (не комплексным). В этом случае комплексные сопротивления Z сохраняют те же углы по отношению к действительной оси R комплексной плоскости сопротивлений, что и э.д.с. и напряжения по отношению к току I (рис. 2,б и 2,в).

Во время прохождения годографа сопротивления Z через малый промежуток ΔZ скорость V перемещения годографа при качаниях можно считать постоянной. Промежуток ΔZ , а значит, и время прохождения этого промежутка наименьшее при равенстве модулей э.д.с. E_1 и E_2 , что и тре-

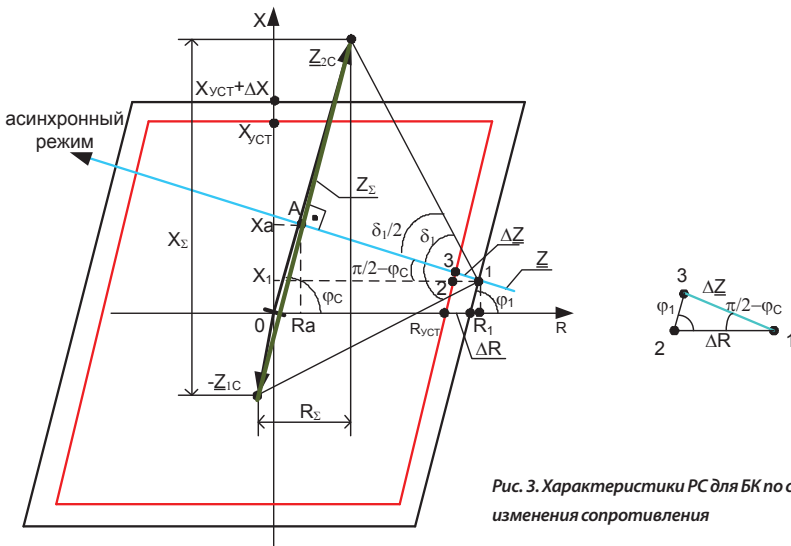


Рис. 3. Характеристики РС для БК по скорости изменения сопротивления

буется в расчётном случае. Годограф \underline{Z} перемещается вдоль прямой 1-A (рис. 3) через точку 1 входа во внешнюю характеристику ИО $d\underline{Z}/dt$ и точку A – среднюю точку (электрический центр энергосистемы) суммарного сопротивления \underline{Z}_Σ [1].

Блокировка ДЗ при качаниях по скорости изменения сопротивления на входе ДЗ использовалась ещё в электромеханических устройствах защиты [2]. Наиболее подробно выбор уставки БК по скорости изменения сопротивления рассмотрен в [3]. Согласно [3], годограф сопротивления на входе защиты при качаниях и в асинхронном режиме описывается уравнением:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_a + j * (\underline{Z}_\Sigma / 2) * ctg(\delta / 2) / 2, \quad (1)$$

где $\underline{Z}_a = (\underline{Z}_{1C} - \underline{Z}_{2C}) / 2$ – сопротивление от места установки защиты до точки A – электрического центра энергосистемы (рис. 3);

$\underline{Z}_\Sigma = (\underline{Z}_{1C} + \underline{Z}_{2C})$ – суммарное сопротивление энергосистем S1 и S2;

$\delta_1 = (\Delta\omega) * t$ – угол между эквивалентными э.д.с. при входе годографа \underline{Z} во внешнюю характеристику ИО $d\underline{Z}/dt$;

$\Delta\omega = 2 * \pi * (\Delta f)$ – угловая скорость расхождения эквивалентных э.д.с. (скольжение) во время качаний или при асинхронном режиме (частоту скольжения (Δf) при прохождении короткого участка характеристики ИО $d\underline{Z}/dt$ можно

принять постоянной).

Скорость \underline{V} изменения сопротивления \underline{Z} при этом определяется формулой [3]:

$$\underline{V} = d\underline{Z}/dt = \pi * \underline{Z}_\Sigma * (\Delta f) / (2 * \sin^2(\delta_1 / 2)). \quad (2)$$

Формула (2) показывает, что скорость изменения сопротивления \underline{Z} , даже при постоянной частоте скольжения Δf , меняется от максимальной при угле δ , близком к нулю (при больших \underline{Z}), до минимальной при угле δ , равном π , – при пересечении линии \underline{Z}_Σ .

Если известны полное сопротивление \underline{Z}_Σ системы в расчётном режиме и угол δ_1 при вхождении годографа \underline{Z} во внешнюю характеристику ИО $d\underline{Z}/dt$, из (2) можно определить предельное минимальное время T прохождения участка между внешней и внутренней характеристиками ИО $d\underline{Z}/dt$ (равное уставке БК) при скольжении с максимальной частотой Δf_{max} [3]:

$$T = (\Delta Z) / V_{max} = 2 * (\Delta Z) * \sin^2(\delta_1 / 2) / (\pi * \underline{Z}_\Sigma * \Delta f_{max}), \quad (3)$$

где ΔZ – длина (сопротивление) промежутка между внешней и внутренней характеристиками ИО $d\underline{Z}/dt$ при изменении \underline{Z} вдоль годографа.

В формуле (3) использованы действительные (не комплексные) значения ΔZ и V, так как скорость изменения сопротивления по прямой вдоль годографа коллинеарна с годографом.

Формула (3) весьма наглядна. В то же время она неудобна для расчёта уставки БК по скорости изменения сопротивления, так как для этого надо сначала произвести расчёт режима и найти угол δ_1 , хотя на самом деле, как будет показано ниже, уставку можно рассчитать и без последнего. Кроме того, в формуле (3) остаётся неопределённым расчётное значение сопротивления системы \underline{Z}_Σ , а от него зависит угол δ_1 , и не определено влияние уставки РС БК по оси R ($R_{уст}$) на уставку T блокировки при качаниях по скорости изменения сопротивления.

Угол δ_1 может быть выражен через абсциссу R_a средней точки системы и абсциссу R_1 точки 1 пересечения траектории \underline{Z} при качаниях с внешней характеристикой ИО $d\underline{Z}/dt$ блокировки [3]:

$$\sin^2(\delta_1 / 2) = X_\Sigma^2 / (4 * (R_a - R_1)^2 + X_\Sigma^2). \quad (4)$$

Найдём ΔZ , решая треугольник 1-2-3 (рис. 3), по стороне ΔR и двум углам ϕ_1 и $(\pi / 2 - \phi_c)$:

$$\Delta Z = (\Delta R) * \sin \phi_1 / \cos(\phi_1 - \phi_c). \quad (5)$$

С учётом (4) и (5) уравнение (3) примет вид:

$$T = \Delta Z / V_{max} = 2 * (\Delta R) * X_\Sigma^2 * \sin \phi_1 / (\pi * \underline{Z}_\Sigma * \cos(\phi_1 - \phi_c) * (\Delta f_{max}) * (4 * (R_a - R_1)^2 + X_\Sigma^2)),$$

а с учётом того, что

$$\underline{Z}_\Sigma = X_\Sigma / \sin \phi_c,$$

уравнение для T имеет вид:

$$T = 2 * (\Delta R) * X_\Sigma * \sin \phi_1 * \sin \phi_c / (\pi * X_\Sigma * \cos(\phi_1 - \phi_c) * (\Delta f_{max}) * (4 * (R_a - R_1)^2 + X_\Sigma^2)) = 2 * (\Delta R) * X_\Sigma / (\pi * (1 + ctg \phi_1 * ctg \phi_c) * (\Delta f_{max}) * (4 * (R_a - R_1)^2 + X_\Sigma^2)), \quad (6)$$

где $\underline{Z}_\Sigma = \sqrt{((R_{2C} + R_{1C})^2 + (X_{2C} + X_{1C})^2)}$ – модуль суммарного сопротивления системы \underline{Z}_Σ ;

ϕ_1 – угол наклона правой части внешней ненаправленной характеристики РС БК; $\phi_c = \text{arctg}((X_{2C} + X_{1C}) / (R_{2C} + R_{1C}))$ – аргумент суммарного сопротивления системы $|\underline{Z}_\Sigma|$;

$\Delta f_{max} = 1 / T_{\text{РАСЧ МИН}}$ – максимальная частота скольжения при качаниях;

$R_a = (R_{2C} - R_{1C}) / 2$ – абсцисса средней точки A системы;



Дони Николай Анатольевич

Окончил НПИ в 1969 году. В 1981 году во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка высокочастотной защиты линий сверхвысокого напряжения». Имеет более 120 научных публикаций в области релейной защиты, микро-процессорной техники и цифровой обработки сигналов электроэнергетических систем. Директор по науке - заведующий отделом перспективных разработок.



Шурупов Алексей Александрович

В 1973 г. окончил НПИ, кандидат технических наук (НПИ, 1981 г.), старший научный сотрудник. Заведующий отделом защит подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».

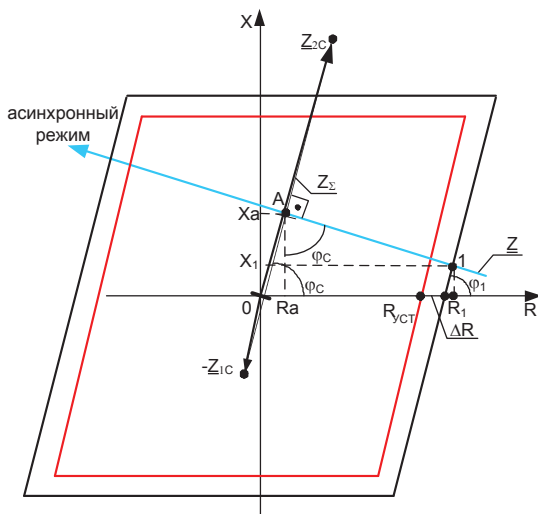


Рис. 4. К расчёту R1

R₁ – абсцисса точки 1 пересечения траектории Z с внешней характеристикой ИО dZ/dt при качаниях (рис. 4);

X_Σ = X_{2C} + X_{1C} – проекция суммарного сопротивления системы Z_Σ на ось X.

Координаты точки 1 однозначно определяются координатами точки А, уставкой R_{уст} реле сопротивления БК и углами наклона Z_Σ и правой границы характеристики РС БК.

Далее, для нахождения R1, решим систему уравнений:

$$\begin{aligned} X_1 &= (R_1 - R_{уст} - \Delta R) * \operatorname{tg} \varphi_1 \\ X_1 &= X_a - (R_1 - R_a) * \operatorname{ctg} \varphi_c \end{aligned}$$

откуда

$$R_1 = (X_a + R_a * \operatorname{ctg} \varphi_c + (R_{уст} + \Delta R) * \operatorname{tg} \varphi_1) / (\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \varphi_c), (7)$$

где X_a = (X_{2C} - X_{1C}) / 2 – ордината средней точки А системы;

R_a = (R_{2C} - R_{1C}) / 2 – абсцисса средней точки А системы;

φ_c = arctg((X_{2C} + X_{1C}) / (R_{2C} + R_{1C})) – аргумент суммарного сопротивления системы Z_Σ;

R_{уст} и ΔR – уставки РС БК.

Подставляя (7) в (6), получим общую формулу для расчёта уставки DT1 блокировки при качаниях дистанционной защиты по скорости изменения сопротивления на входе защиты:

$$T = 2 * (\Delta R) * X_{\Sigma} / (\pi * (\Delta f_{max}) * (1 + \operatorname{ctg} \varphi_1 * \operatorname{ctg} \varphi_c) * (4 * (R_a - (X_a + R_a * \operatorname{ctg} \varphi_c + (R_{уст} + \Delta R) * \operatorname{tg} \varphi_1) / (\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \varphi_c))^2 + X_{\Sigma}^2)). (8)$$

Однострочная формула (8) может быть записана в виде выражения с горизонтальной дробной чертой:

$$T = \frac{2 * (\Delta R) * X_{\Sigma}}{\pi * (\Delta f_{max}) * (1 + \operatorname{ctg} \varphi_1 * \operatorname{ctg} \varphi_c) * (4 * \dots)}$$

$$\dots * \left(R_a - \frac{X_a + R_a * \operatorname{ctg} \varphi_c + (R_{уст} + \Delta R) * \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \varphi_c} \right)^2 + X_{\Sigma}^2). (8')$$

Формула (8) менее наглядна, чем формула (3), но она позволяет автоматизировать вычисления, анализировать результаты и оценивать влияние параметров РС БК и параметров системы на расчётную уставку БК по скорости изменения сопротивления.

Формула (8) более удобна для использования в вычислительных программах, например, в EXCEL, а формула (8') – для единичных расчётов «вручную».

Пример: при расчётных параметрах, заданных в табл. 1, расчётная уставка DT1 равна 8 мс.

Табл. 1. Расчётные параметры

Параметр	Единица изм.	Значение
X _{1C}	Ом	5
X _{2C}	Ом	10
R _{1C}	Ом	1
R _{2C}	Ом	4
Δf _{max}	Гц	2
ΔR	Ом	1
R _{уст}	Ом	8
φ ₁	радиан	π/4

Заключение

Уставка (DT1) БК по скорости изменения сопротивления может быть рассчитана по формуле (8) на основе параметров РС, используемых в БК, и данных об эквивалентной схеме сети.

Литература

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
2. Атабеков Г.И. Дистанционный принцип защиты дальних электропередач. – Ереван: Изд. АН Армянской ССР, 1953. – 216 с.
3. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 548 с.