

РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ И ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

КУТЯВИН И. Д.

Доцент, кандидат технических наук

Руководящие указания по релейной защите (Р.У.) в новом издании (том II, раздел Г—4, § 5) рекомендуют применять для расчета защиты генераторов от замыканий на корпус только графо-аналитический способ расчета, считая его более совершенным. Этот способ расчета безусловно следует применять для выбора основных параметров защиты по действительной характеристике реле при наладке защитных устройств, но применение его при проектировании защиты, когда используется теоретическая характеристика реле, не имеет смысла, так как аналитический способ требует для расчета значительно меньше труда и дает не менее точные результаты.

Аналитический способ расчета защиты, приведенный в первом издании Р.У., к настоящему времени устарел и поэтому, очевидно, не рекомендуется к применению. В настоящей работе этот способ дается в переработанном виде с учетом основных требований Р.У. Однако в статье приводится лишь вывод основных уравнений для расчета, так как методика выбора отдельных расчетных данных может быть взята из Р.У.

Определение расчетных данных

Большим недостатком рекомендуемого Р.У. метода расчета является введение целого ряда понятий токов ($I_{згт}$, $I_{згт}^{(1)}$, $I_{зст}$, $I_{зрасч}$ и $I_{зм}$), что чрезвычайно запутывает расчет защиты и часто приводит к неправильному пониманию вопроса. В настоящей работе вводятся лишь два расчетных тока:

$I_{зм}$ — максимальный ток замыкания на землю, протекающий через внешние трансформаторы тока при замыкании на корпус клеммы генератора, если к сети генераторного напряжения приключена лишь одна заземленная нулевая точка.

$I_{дм}$ — максимально-допустимый ток в дуге в месте пробоя на корпус при замыкании клеммы генератора, если к сети генераторного напряжения приключены все заземленные нулевые точки. Этот ток определяется согласно Р.У. (том II, раздел Г—1, § 5).

Оба тока связаны соотношением

$$I_{дм} = p_m I_{зм}, \quad (1)$$

где p_m — максимальное число заземленных нулевых точек в системе генераторного напряжения, приключаемых одновременно к шинам и имеющим одинаковые сопротивления заземления.

При различных сопротивлениях заземления максимальное число заземленных нулевых точек определяется из следующего:

$$n_{\Sigma} = R_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \right), \quad (2)$$

где R_1 — сопротивление заземления рассматриваемой нулевой точки,
 $R_2, R_3, \dots$ — сопротивления заземления других нулевых точек.

Напряжение на заземляющем сопротивлении при замыкании на корпус W_x витков обмотки статора через некоторое сопротивление в месте замыкания

$$U_3 = \frac{U_{\Phi}}{W_{\Phi}} W_x K_{\Sigma} = U_{\Phi} K_{\Sigma} x, \quad (3)$$

где U_{Φ} — фазовое напряжение генератора,
 W_{Φ} — полное число витков в фазе обмотки статора,
 x — относительное число витков, замкнувшихся на корпус,
 K_{Σ} — коэффициент полноты замыкания на землю.
 Напряжение на клеммах ваттметрового реле

$$U_p = \frac{U_3}{n_{\Sigma}} = \frac{U_{\Phi} K_{\Sigma} x}{n_{\Sigma}} = U_{p\Sigma} K_{\Sigma} x, \quad (4)$$

где n_{Σ} — коэффициент трансформации нулевого трансформатора напряжения.

Максимальное напряжение на клеммах реле при $x=1$ и $K_{\Sigma}=1$:

$$U_{p\Sigma} = \frac{U_{\Phi}}{n_{\Sigma}}. \quad (5)$$

Ток, притекающий в токовую цепь защиты со стороны нулевого трансформатора напряжения на основании рис. 1,

$$i_n = \frac{U_p}{r_d + \frac{0,33 Z_x - Z_p}{0,33 Z_x + Z_p}} \cong \frac{U_p}{r_d} = \frac{U_{p\Sigma}}{r_d} K_{\Sigma} x = i_{n\Sigma} K_{\Sigma} x, \quad (6)$$

где r_d — добавочное сопротивление в цепи нулевого трансформатора напряжения,

Z_x — сопротивление холостого хода внешних трансформаторов,

Z_p — сопротивление токовой катушки реле.

Максимальное значение этого тока на основании (6) при $x=1$ и $K_{\Sigma}=1$

$$i_{n\Sigma} \cong \frac{U_{p\Sigma}}{r_d}. \quad (7)$$

Ток, притекающий в токовую катушку реле со стороны нулевого трансформатора напряжения

$$i_{np} = i_n \frac{0,33 Z_x}{0,33 Z_x + Z_p} = i_{n\Sigma} K_{\Sigma} K_0 x, \quad (8)$$

где $K_0 = \frac{0,33 Z_x}{0,33 Z_x + Z_p}$ — коэффициент отсоса.

Ток в рассматриваемом заземляющем сопротивлении

$$I_2 = \frac{U_3}{R_1} = \frac{U_{\Phi} K_{\Sigma} x}{R_1} = I_{2\Sigma} K_{\Sigma} x; \quad (9)$$

максимальное значение этого тока на основании (9) при $K_n = 1$ и $x = 1$:

$$I_{3m} = \frac{U_\Phi}{R_1}. \quad (10)$$

Ток, притекающий в токовую катушку реле со стороны внешних трансформаторов тока и обусловленный протеканием в первичной цепи тока I_3 :

$$i_{вр} = \frac{I_3}{n_T} K_0 K_n = \frac{I_{3m}}{n_T} K_0 K_n x = i_{вм} K_0 K_n x. \quad (11)$$

Максимальное значение этого тока при $x = 1$ и $K_n = 1$

$$i_{вм} = \frac{I_{3m}}{n_T}, \quad (12)$$

где n_T — коэффициент трансформации внешних трансформаторов тока.

Расчет защиты по схеме рис. 1

а) Замыкание на землю вне зоны защиты рассматриваемого генератора (например, в обмотке статора соседнего генератора) через некоторое переходное сопротивление.

Ток в токовой обмотке ваттметрового реле

$$i'_p = i_{нр} - K_\tau i_{вр} + i_{нб} = (i_{нм} - K_\tau i_{вм}) K_0 K_n x + i_{нб}, \quad (13)$$

где K_τ — коэффициент, учитывающий нагрев заземляющего сопротивления током. Для чугунных спиралей этот коэффициент, согласно Р.У., равен 0,8, а для сплавов с малым температурным коэффициентом сопротивления он равен единице.

Для того чтобы защита рассматриваемого генератора не работала, ток i'_p , согласно (13), должен быть при всех значениях x меньше тока трогания ваттметрового реле (условие селективности)

$$i'_p \leq \beta i_{рт} = \beta \frac{P_{рт}}{U_{рм} x}, \quad (14)$$

где β — коэффициент запаса.

На основании (13) и (14)

$$\beta = \frac{i'_p}{i_{рт}} = \frac{[(i_{нм} - K_\tau i_{вм}) K_0 K_n x + i_{нб}] U_{рм} x}{P_{рт}}. \quad (15)$$

На рис. 2 построены следующие кривые в функции от x :

1) прямая селективности на основании (13);

2) кривая тока трогания ваттметрового реле $i_{рт} = \frac{P_{рт}}{U_{рм} x}$;

3) кривая изменения коэффициента запаса на основании (15). Как видно из рис. 2, коэффициент запаса β при некотором значении x достигает максимума. На основании условия селективности (14) максимальное значение коэффициента запаса должно быть меньше единицы.

Определим x , при котором β , согласно выражению (15), достигает максимума:

$$\frac{d\beta}{dx} = \frac{[2(i_{нм} - K_\tau i_{вм}) K_0 K_n + i_{нб}] U_{рм}}{P_{рт}} = 0,$$

откуда

$$x_{\beta m} = - \frac{i_{нб}}{2(i_{нм} - K_\tau i_{вм}) K_0 K_n}. \quad (16)$$

На основании (15) и (16)

$$i_{\text{вм}} = \frac{i_{\text{нб}}^2 U_{\text{рм}}}{4\beta_m K_0 K_{\text{п}} K_{\text{т}} P_{\text{рт}}} + \frac{i_{\text{нм}}}{K_{\text{т}}} . \quad (17)$$

б) Замыкание на корпус в обмотке рассматриваемого генератора через некоторое переходное сопротивление при наличии в работе только одной заземленной нулевой точки (нулевая точка рассматриваемого генератора).

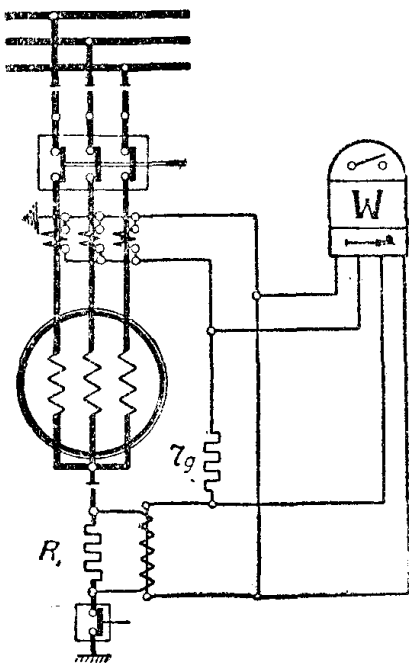


Рис. 1

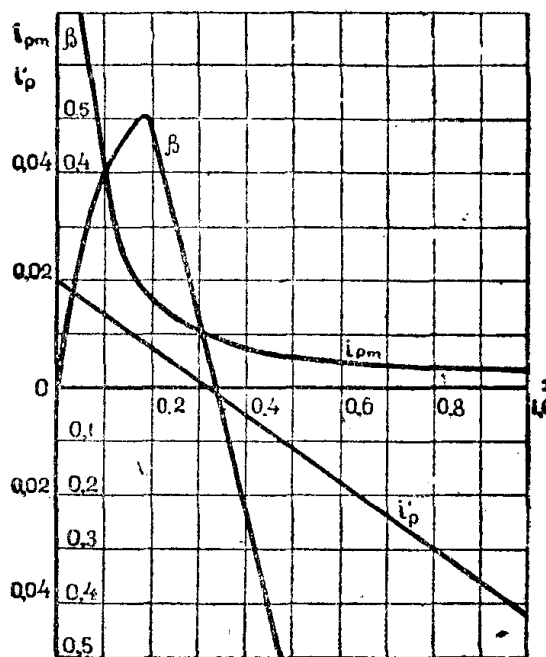


Рис. 2

Ток в токовой обмотке ваттметрового реле при замыкании на корпус на границе мертвой зоны

$$i''_{\text{р}} = i_{\text{нм}} K_0 K_{\text{п}} x - i_{\text{нб}} . \quad (18)$$

Для того чтобы защита сработала, необходимо выполнение условия чувствительности:

$$i''_{\text{р}} \geq i_{\text{рт}} = \frac{P_{\text{рт}}}{U_{\text{рм}} x} . \quad (19)$$

На основании (18) и (19)

$$i_{\text{нм}} = \frac{1}{K_0 K_{\text{п}}} \left(\frac{P_{\text{рт}}}{x^2 U_{\text{рм}}} + \frac{i_{\text{нб}}}{x_0} \right) . \quad (20)$$

На основании (12), (17) и (20)

$$I_{\text{зм}} = \frac{\pi_{\text{т}}}{K_{\text{п}} K_0 K_{\text{т}}} \left(\frac{i_{\text{нб}}^2 U_{\text{рм}}}{4\beta P_{\text{рт}}} + \frac{P_{\text{рт}}}{x_0^2 U_{\text{рм}}} + \frac{i_{\text{нб}}}{x_0} \right) . \quad (21)$$

Из выражения (21) при известном токе $I_{\text{зм}}$ может быть определена мертвая зона x_0 или мощность трогания реле $P_{\text{рт}}$.

Выражения (20) и (21), связывающие между собою основные параметры защиты, являются расчетными уравнениями.

Структура выражения (21) позволяет определить оптимальную мощность трогания, при которой ток $I_{\text{зм}}$ имеет минимальное значение. Опти-

мальная мощность трогания определяется дифференцированием выражения (21):

$$\frac{dI_{зм}}{dP_{рт}} = -\frac{i_{нб}^2 U_{рм}}{4\beta_m P_{рт}^2} + \frac{1}{x_0^2 \cdot U_{рм}} = 0,$$

откуда

$$P_{рт} = \frac{i_{нб} \cdot U_{рм} x_0}{2\sqrt{\beta_m}}. \quad (22)$$

На основании (20) и (22)

$$i_{нм} = \frac{i_{нб} (0,5 + \sqrt{\beta_m})}{K_0 K_n x_0 \sqrt{\beta_m}}. \quad (23)$$

На основании (21) и (22)

$$I_{зм} = \frac{n_T i_{нб} (1 + \sqrt{\beta_m})}{K_0 K_n K_\tau x_0 \sqrt{\beta_m}}. \quad (24)$$

К сожалению, уравнения (22), (23) и (24) не могут быть использованы для расчета, так как мощность трогания согласно (22) получается в пределах 0,1 вт, а минимальная мощность трогания для реле ИМ-143 завода ХЭМЗ составляет 0,15 вт.

в) Замыкание на корпус в зоне защиты рассматриваемого генератора при числе заземленных нулевых точек, равном n .

Уравнение чувствительности

$$\left[(i_{нм} + (n-1) \frac{I_{зм}}{n_T}) K_0 K_n x_{оп} - i_{нб} \right] = \frac{P_{рт}}{x_{оп} U_{рм}}, \quad (25)$$

где n —при неравных сопротивлениях заземления нулевых точек определяется согласно (2).

Решение уравнения (25) относительно $x_{оп}$ дает выражение для величины мертвой зоны при любом числе заземленных нулевых точек:

$$x_{оп} = \frac{i_{нб} + \sqrt{i_{нб}^2 + 4 \frac{P_{рт}}{U_{рм}} K_0 K_n \left[i_{нм} + (n-1) \frac{I_{зм}}{n_T} \right]}}{2 K_0 K_n \left[i_{нм} + (n-1) \frac{I_{зм}}{n_T} \right]}. \quad (26)$$

Расчет защиты по схеме рис. 3

а) Замыкание на корпус в обмотке соседнего генератора через некоторое переходное сопротивление, учитываемое коэффициентом полноты замыкания K_n .

Тормозной ток, притекающий в токовую цепь защиты со стороны нулевого трансформатора напряжения:

$$i_T \cong \frac{U_p}{r_d} = \frac{U_{рм}}{r_d} K_n x = i_{тм} K_n x. \quad (27)$$

Максимальное значение этого тока при $x=1$ и $K_n=1$

$$i_{тм} \cong \frac{U_{рм}}{r_d}. \quad (28)$$

Ток, притекающий в токовую катушку реле

$$i'_p = -i_{тм} K_n K_0 x + i_{нб}. \quad (29)$$

Для того чтобы защита рассматриваемого генератора не работала, необходимо, чтобы i'_p из (29) при всех значениях x было меньше тока трогания ваттметрового реле (условие селективности):

$$i'_p \leq \beta i_{pt} = \beta \frac{P_{pt}}{U_{pm} x}. \quad (30)$$

Решая вопрос аналогично предыдущему, получим следующее выражение для максимального тормозного тока:

$$i_{tm} = \frac{i_{нб}^2 U_{pm}}{4\beta_m K_0 K_n P_{pt}}. \quad (31)$$

б) Замыкание на корпус в обмотке рассматриваемого генератора через некоторое переходное сопротивление при наличии в работе одной заземленной нулевой точки.

Ток в токовой катушке ваттметрового реле при замыкании на землю на границе мертвой зоны

$$i''_p = (-i_{tm} + i_{вм}) K_0 K_n x_0 - i_{нб} \quad (32)$$

Для того чтобы защита сработала, необходимо соблюдение условия чувствительности

$$i''_p \geq i_{pt} = \frac{P_{pt}}{U_{pm} x_0}. \quad (33)$$

На основании (12), (13), (32) и (33)

$$I_{зм} = \frac{n_T}{K_0 K_n} \left(\frac{i_{нб}^2 U_{pm}}{4\beta_m P_{pt}} + \frac{P_{pt}}{U_{pm} x_0^2} + \frac{i_{нб}}{x_0} \right). \quad (34)$$

Уравнения (31) и (34) являются расчетными для данной схемы. Аналогично предыдущему оптимальная мощность трогания

$$P_{pt} = \frac{x_0 U_{pm} i_{нб}}{2 \sqrt{\beta_m}}. \quad (35)$$

Максимальный тормозной ток при оптимальной мощности трогания

$$i_{tm} = \frac{i_{нб}}{2 K_0 K_n x_0 \sqrt{\beta_m}}. \quad (36)$$

Максимальный ток замыкания на землю для рассматриваемой нулевой точки

$$I_{зм} = \frac{n_T i_{нб} (1 + \sqrt{\beta_m})}{K_0 K_n x_0 \sqrt{\beta_m}}. \quad (37)$$

Величина мертвой зоны при расчетном числе заземленных нулевых точек, равно n ,

$$x_{оп} = \frac{i_{нб} + \sqrt{i_{нб}^2 + 4 \frac{P_{pt}}{U_{pm}} K_0 K_n \left(-i_{tm} + n \frac{I_{зм}}{n_T} \right)}}{2 K_0 K_n \left(-i_{tm} + n \frac{I_{зм}}{n_T} \right)} \quad (38)$$

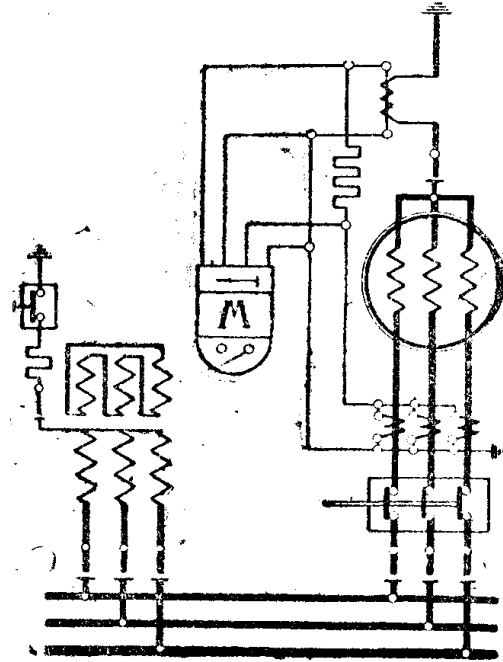


Рис. 3

Расчет защиты трансформаторов от замыканий на землю

На рис. 4 приведена схема защиты трансформаторов от замыканий на землю, рекомендуемая Р. У. (том II, раздел Т-1). Эта схема совершенно одинакова со схемой защиты генераторов рис. 3, поэтому уравнения (31) и (34) являются расчетными и для данного случая.

При замыкании на корпус в обмотке трансформатора, соединенной треугольником, минимальное напряжение на клеммах реле составляет $0,5 U_{рм}$, поэтому для увеличения надежности желательно принимать при расчете защиты величину мертвой зоны $x_0 \leq 0,4$.

Пример. Произвести расчет защиты генераторов от замыканий на корпус, если известно, что на станции установлено 3 генератора мощностью по 12 мвт. Номинальный ток генераторов 1375 а и номинальное напряжение 6,3 кв.

Расчетные данные (определяются на основании Р. У.).

Коэффициент трансформации внешних трансформаторов тока $n_T = \frac{1500}{10}$ а и нулевого

трансформатора напряжения $n_n = \frac{6000}{100}$ в.

Коэффициент отсоса внешних трансформаторов тока $K_0 = 0,8$. Коэффициент запаса $\beta_m = 0,5$. Коэффициент полноты замыкания на землю $K_n = 1$. Расчетный ток небаланса

0,02 а. Мощность трогания ваттметрового реле $P_{рт} = 0,2$ вт. Величина допустимой мертвой зоны $x_0 = 0,13$. Величина максимально допустимого тока в дуге $I_{дм} = 180$ а.

Сопротивления заземления предполагаются из реотановых полей.

Максимальное напряжение на клеммах реле на основании (5)

$$U_{рм} = \frac{6300}{\sqrt{3.60}} = 61 \text{ в.}$$

Максимальный ток замыкания на землю, при работе генератора в одиночку на основании (21) и при применении схемы рис. 1

$$I_{зм} = \frac{150}{0,8} \left(\frac{0,02^2 \cdot 61}{4 \cdot 0,05 \cdot 0,2} + \frac{0,2}{0,13^2 \cdot 61} + \frac{0,02}{0,13} \right) = 77 \text{ а.}$$

Действительное значение тока в дуге на основании (1) при параллельной работе всех трех генераторов с заземленными нулевыми точками

$$I_d = 3.77 = 231 > I_{дм} = 180 \text{ а.}$$

Следовательно, применение схемы защиты по рис. 1 возможно лишь для двух генераторов (№ 1 и 2), поэтому для третьего генератора принимается схема защиты по рис. 3, тогда действительный ток в дуге

$$I_d = 2.77 = 154 \text{ а.}$$

Сопротивление заземления нулевых точек генераторов № 1 и 2 на основании (10)

$$R_1 = R_2 = \frac{6300}{\sqrt{3.77}} = 47,3 \text{ ом.}$$

Максимальное значение нулевого тока во вторичной цепи защиты на основании (20)

$$i_{\text{нм}} = \frac{1}{0,8} \left(\frac{0,2}{0,13^2 \cdot 61} + \frac{0,02}{0,13} \right) \cong 0,435 \text{ а.}$$

Добавочное сопротивление во вторичной цепи защиты для генераторов № 1 и 2 на основании (7)

$$r_d = \frac{61}{0,435} = 140 \text{ ом.}$$

Величина мертвой зоны защиты генераторов № 1 и 2 при наличии в работе двух заземленных нулевых точек на основании (26)

$$x_{02} = \frac{0,02 + \sqrt{0,02^2 + 4 \frac{0,2 \cdot 0,8}{61} \left[0,435 + (2-1) \frac{77}{150} \right]}}{2 \cdot 0,8 \cdot \left[0,435 + (2-1) \frac{77}{150} \right]} = 0,08.$$

При работе генератора № 3 в одиночку необходимый для защиты ток замыкания на землю создается заземлением нулевой точки трансформатора собственных нужд через сопротивление 47,3 ома.

Максимальный тормозной ток в токовой цепи защиты генератора № 3 на основании (31)

$$i_k = \frac{0,02^2 \cdot 61}{4 \cdot 0,5 \cdot 0,2 \cdot 0,8} = 0,0763 \text{ а.}$$

Добавочное сопротивление во вторичной цепи защиты генератора № 3 на основании (26)

$$r_d = \frac{61}{0,0736} = 800 \text{ ом.}$$

Величина мертвой зоны защиты генератора № 3 при наличии в работе двух заземленных нулевых точек на основании (38)

$$x_{02} = \frac{0,02 + \sqrt{0,02^2 + 4 \frac{0,2 \cdot 0,8}{61} \left(-0,0763 + 2 \frac{77}{150} \right)}}{2 \cdot 0,8 \left(-0,0763 + 2 \frac{77}{150} \right)} = 0,08.$$

Вывод

Приводимый аналитический способ расчета позволяет производить расчет защиты со значительно меньшей затратой труда. Этот способ является более простым и наглядным по сравнению с рекомендуемым Р. У. издания 1939 г.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
89	Рис. 3	(Рисунок перевернут)	
92	7 снизу	i_{02}	$-i_{02}$
95	19 снизу	Z	Z_T
97			В уравнении (27) α является показателем степени
98	19 снизу	$Z_m \Delta$	$Z_m V$
101	15 снизу	окружающей	окружностей
178	17 снизу	$s = \frac{n}{n}$	$s = \frac{n}{n_0}$
193	4 сверху	$I_2^2 = \frac{E}{1 + Z^2}$	$I_2^2 = \frac{\varepsilon}{1 + Z^2}$
203	12 сверху	$I = I_m \left(1 - e^{-\frac{\Gamma_m}{L_m} t} \right) = \dots$	$I = I_m \left(1 - e^{-\frac{\Gamma_m}{L_m} t} \right) = \dots$
203	17 снизу	закрывающихся	закрывающийся
214	8 снизу	(28)	(26)
221	4 сверху	$\dots \frac{i_0^2 - i''_a}{i_{01} - i''_a}$	$\dots \frac{i_{02} - i''_a}{i_{01} - i''_a}$
318	Подпись к рис. 5	Потери тепла неполноты горения.	Потери тепла от неполноты горения.
318	14 снизу	(рис. 3)	(рис. 4)
323	1 сверху	аттуру	пературу
323	1 сверху	$r = 58$	$r = 587$
325	На рис. 6	$q'_{\text{вод}}$ и $q''_{\text{вод}}$	$q'_{\text{вод}}$ и $q''_{\text{вод}}$
326	33 сверху	$/2 \cdot 3 + 25 = 293 \text{ K},$	$/273 + 25 = 293 \text{ K},$