

1. Уставки электрических защит резервного дизель-генераторного агрегата щита АВР котельной по адресу: г. Санкт-Петербург, пер. Декабристов, д.10, корп. 2, лит. А

1.1 Питание щита АВР от резервного дизель-генератора

Проектом предусматривается подключение к шинам 0,4 кВ щита АВР в качестве резервного источника питания стационарной дизельной электростанции GMGen GMC44 (40 кВА)~400 В, 32кВт,/40кВА производства компании "GMGen Power Systems" мощностью 32 кВт. Дизельная электростанция комплектуется двигателем "CUMMINS". Генераторная установка "Stamford" (Англия) модели P1144J. Для расчётов используются заводские (паспортные) данные установки, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Расчётные параметры генератора

| P_H | S_H | U_H | $\cos \varphi_H$ | X'_d | X''_d |
|-------|-------|-------|------------------|--------|---------|
| кВт | кВА | В | - | о.е. | о.е. |
| 32 | 40 | 400 | 0,8 | 0,18 | 0,13 |

| X_d | X_2 | X_0 | OK3 | I_H | T''_d |
|-------|-------|-------|------|-------|---------|
| о.е. | о.е. | о.е. | о.е. | А | с |
| 1,92 | 0,17 | 0,08 | 0,52 | 57,6 | 0,014 |

При питании от генератора ток к.з. меняется с течением времени. Для расчетов защит важно знать ток трехфазного к.з. при $t = 0$ и $t = \infty$. Значения сверхпереходных токов $I_{к0R}^{(3)}$ в сети 0,4 кВ находим расчетным путем [2], [3].

$$I_{к0R}^{(3)} = \frac{E_0}{\sqrt{3 \cdot Z_{\Sigma}}},$$

$$\text{где } E_0 = E''_{|0|} = \sqrt{(U_{|0|} \pm I_{|0|} X''_d \sin \varphi_{|0|})^2 + (I_{|0|} X''_d \cos \varphi_{|0|})^2};$$

$$U_{|0|} = U_{н.з.}$$

| | | | | | |
|--|-----------|------|------|--|-------|
| 840/ПУ-2018-Декабр-10-МК-ЭС.РР | | | | | |
| Модернизация котельной в части установки стационарной дизель-генераторной установки по адресу: г. Санкт-Петербург, пер. Декабристов, д.10, корп.2, лит.А | | | | | |
| Изм. | Кол.уч | Лист | №док | Подп. | Дата |
| Разраб. | Старченко | | | | 05.19 |
| Проверил | Кокорина | | | | 05.19 |
| Гл. спец. | Кокорина | | | | 05.19 |
| Н.контр | Грунев | | | | 05.19 |
| ГИП | Мякота | | | | 05.19 |
| Расчеты (начало) | | | | Электроснабжение. Дизель-генераторная установка | |
| | | | | Стадия | Лист |
| | | | | Р | 1 |
| | | | | Листов | 7 |
| | | | | ЗАО «СПб Институт Теплоэнергетики» | |

Можно, с приемлемой для электротехнических расчётов точностью, воспользоваться упрощённым выражением:

$$E_0 = (1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{н.з.}) \cdot U_{н.з.} = (1 + 0,16 \cdot 0,6) \cdot 0,4 = 0,44 \text{ кВ} \quad - \text{ сверхпереходная э.д.с.}$$

генератора, здесь операнды в скобках даны в относительных единицах или $E_{*0} = 1,09$.

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{(x_{\Sigma}^2 + (r_{\Sigma} + R_n)^2)} = \sqrt{(x_k + x_2)^2 + (r_k + r_2 + R_n)^2} - \text{расчетное сопротивление до}$$

точки к.з., $X_{Г}$, $\Gamma_{Г}$ - внутренние индуктивное и активное сопротивления генератора в условиях

междуфазного к.з. в питаемой сети (табл.2), $x_2 = x_d'' \times \frac{U_{н.з.}^2}{S_{н.з.}} = 0,13 \times \frac{0,4^2}{0,04} = 0,52 \text{ Ом}$ - сверхпереходное продольное реактивное сопротивление, X_k , Γ_k - суммарное индуктивное и активное сопротивление кабелей внешней сети до точки повреждения, $\Gamma_{Г} \approx 0$ активное сопротивление статора генератора, $R_n = 15 \text{ мОм}$ - переходное сопротивление дуги в месте к.з.

Установившиеся токи к.з. находятся по расчетным кривым. При этом используются кривые [2], [3] для генераторов малой мощности с АВР и системой самовозбуждения.

Выполнен расчет токов однофазных к.з. при питании от резервного дизель-генератора на основании предоставленных данных о технических параметрах генератора. Значения токов однофазных к.з. в расчётных точках сети 0,4 кВ приведены в табл. 3, а 3-х фазных к.з. - в табл. 2.

Таблица 2

Расчет токов 3-х фазного к.з. в характеристических точках сети 0,4 кВ котельной при питании от резервного дизель-генератора

| Точка к.з. | $r_{\Sigma} + R_n$ | x_{Σ} | Z_{Σ} | $I_{к0R}^{(3)} = \frac{E_0}{\sqrt{3 \cdot Z_{\Sigma}}}$ | $Z_{расч.*} = Z_{\Sigma} \cdot \frac{S_{НГ}}{U_{ср}^2}$ | $I_{к*\infty R}^{(3)}$ | $I_{к\infty R}^{(3)} = I_{к*\infty R}^{(3)} \cdot I_{НГ}$ |
|-------------------------|--------------------|--------------|--------------|---|---|------------------------|---|
| | МОм | МОм | МОм | кА | о.е. | о.е. | кА |
| Выводы ДГУ | 15,0 | 520,0 | 520,2 | 0,485 | 0,1301 | 2,97 | 0,1723 |
| Шины щита АВР (проект.) | 49,5 | 522,8 | 525,2 | 0,479 | 0,1313 | 2,95 | 0,1711 |
| ХТ1 ЩС1 (сущ.) | 67,8 | 523,8 | 528,2 | 0,477 | 0,1321 | 2,93 | 0,1699 |
| Шины ГРЩС (сущ.) | 117,8 | 526,5 | 539,5 | 0,467 | 0,135 | 2,91 | 0,1687 |
| СН 15 кВт (сущ.) | 140,89 | 527,1 | 545,5 | 0,462 | 0,1364 | 2,9 | 0,1682 |

Таблица 3

| | | | | | | | |
|------|--------|------|------|-------|------|---|------|
| | | | | | | 840/ПУ-2018-Декабр-10-МК-ЭС.РР (продолжение) | Лист |
| Изм. | Кол.уч | Лист | №док | Подп. | Дата | | 2 |

Расчет токов однофазного к.з. в характеристических точках сети 0,4 кВ котельной при питании от резервного дизель-генератора

| Точка к.з | $X''_{Г1}$ | $X_{Г2}$ | $X_{Г0}$ | $Z_{Г1}/3$ | $Z_{Г1}/3 + Z_{ПТ}$ | $I^{(1)}_{к0R}$ | Прим. |
|-------------------------|------------|----------|----------|------------|---------------------|-----------------|-------|
| | МОм | МОм | МОм | МОм | МОм | кА | |
| Выводы ДГУ | 520 | 680 | 320 | 506,9 | 506,9 | 0,456 | |
| Шины щита АВР (проект.) | - | - | - | - | 589,1 | 0,392 | |
| ХТ1 ЩС1 (сущ.) | - | - | - | - | 632,5 | 0,366 | |
| Шины ГРЩС (сущ.) | - | - | - | - | 750,1 | 0,308 | |
| СН 15 кВт (сущ.) | - | - | - | - | 804,8 | 0,287 | |

1.2 Уставки защит выключателя 2QF резервного ввода щита АВР

На вводе напряжения от генератора установлен автоматический выключатель Compact NSX100N производства «Merlin Gerin», с электронным максимальным расцепителем тока Micrologic 5.2А на номинальный ток $I_n = 40$ А.

Диапазон уставок защит:

- расцепитель $I_R = (0,4-0,5-0,6-0,7-0,8-0,9-0,95-0,98-1) \cdot I_n$,
время срабатывания $t_R = (0,5-1-2-4-8-16)$ с при $6 \cdot I_R$;
- селективная токовая отсечка $I_{sd} = (1,5-2-3-4-5-6-8-10) \cdot I_R$, $t_{sd} = (0-0,1-0,2-0,3-0,4)$ с при I^2t – «on»/«off»;
- токовая отсечка $I_i = (1,5-2-3-4-5-6-8-10-11-12-13-14-15) \cdot I_n$;
- защита от замыкания на землю** $I_h = (0,2-0,3-0,4-0,5-0,6-0,7-0,8-1) \cdot I_n$,
время срабатывания $t_h = 0-0,1-0,2-0,3-0,4$ с.

Согласно данным из альбома РД шифр 840/ПУ-2018-Декабр-10-МК-ЭС,

** - Функция доступна в случае оснащения аппарата расцепителем Micrologic 6.2

| | | | | | | | |
|------|--------|------|------|-------|------|---|------|
| | | | | | | 840/ПУ-2018-Декабр-10-МК-ЭС.РР (продолжение) | Лист |
| Изм. | Кол.уч | Лист | №док | Подп. | Дата | | 3 |

максимальная расчётная мощность наружки, питаемой от стационарной резервной дизельной электростанции составляет 16 кВА (14,2 кВт) и соответствует разрешенной к присоединению по Договору на электроснабжение мощности электроустановки.

Значению расчетного тока при $\cos\varphi = 0,89$:

$$I_p = P_p / (1,73 \cdot U_n \cdot \cos\varphi) = 14,2 / (1,73 \cdot 0,4 \cdot 0,89) = 25 \text{ А.}$$

Ток срабатывания селективной токовой отсечки (МТЗ 2-й ступени) определяется из условия отстройки от максимального рабочего тока с учетом самозапуска и переходных процессов:

$$I \gg I_{c.3.2} = k_n k_{c3n} I_{\text{раб.макс.}} / k_g = 1,15 \cdot 2,4 \cdot 25 / 0,99 = 69,7 \text{ А}$$

где k_n – коэффициент несрабатывания (запаса) $k_n = 1,15$;

k_g – коэффициент возврата цифрового реле $k_g = 0,99$;

k_{c3n} – коэффициенту самозапуска, с учётом преобладания в составе нагрузки электродвигателей центробежных насосов с вентиляторной характеристикой, присваивается значение $k_{c3n} = 2,4$.

Принимаются следующие уставки:

- защиты от перегрузок $I_R^{(1)} = 0,8 \cdot I_n = 0,8 \cdot 40 = 32 \text{ А}$, $t_R = 8,0 \text{ с}$;
- селективная токовая отсечка $I_{sd}^{(1)} = 4,0 \cdot I_R = 4,0 \cdot 32 = 128 \text{ А}$, $t_{sd} = 0,3 \text{ с}$ при $I^2 t - \ll\text{off}\gg$;
- токовая отсечка $I_i = 15 \cdot I_n$ (не используется);
- от замыканий на землю $I_h = 1 \cdot I_n$, $t_h = 0,4 \text{ с}$ в зоне $I^2 t - \ll\text{off}\gg$ (не используется).

Чувствительность МТЗ к минимальным токам к.з. при питании щита АВР от ДГА (при $Z_{\text{расч}} < 0,65$ $I_{\text{к мин}} = I_{\text{к∞ R}}^{(3)}$)

$$- \text{ при } I_{\text{к∞}}^{(3)}, k_{\text{ч∞}}^{(3)} = 168 \text{ А} / 128 \text{ А} \approx 1,3$$

$k_{\text{ч∞}}^{(1)}$ соответствует требованиям глав 3.2, 5.3 ПУЭ [1] для использования в качестве резервной. Повышение чувствительности может привести к ложному срабатыванию во время пуска/самозапуска электродвигателей насосных агрегатов.

Время отключения минимальных расчётных ТКЗ составит 0,3 с, что соответствует требованиям ПУЭ изд. 7 п. 1.7.79 (в системе TN, в цепях, питающих распределительные и др. щиты и щитки, допустимое время отключения не должно превышать 5 сек. при фазном напряжении в питающей сети $U_f = 220 \text{ В}$).

1) – По согласованию с защитами двигателей 15 кВт СН1/2 (см. л.6)

| | | | | | | | |
|------|--------|------|------|-------|------|---|------|
| | | | | | | 840/ПУ-2018-Декабр-10-МК-ЭС.РР (продолжение) | Лист |
| Изм. | Кол.уч | Лист | №док | Подп. | Дата | | 4 |

1.3 Уставки токовых защит генера

Для аппаратной защиты генератора дизельной электростанции в штатной комплектации используется автоматический выключатель iC60N модульного типа с характеристикой “С” $I_n = 63$ А. Помимо этого, существует возможность реализации настраиваемых на панели управления GMCA20-04 защит от сверхтоков, действие которых приводит к срабатыванию сигнализации и(или) аварийному останову агрегата.

В соответствии с расчётными значениями ТКЗ (таблицы 2, 3 п. 1.1) и мощности подключаемой нагрузки (см. альбом РД шифр 840/ПУ-2018-Декабр-10-МК-ЭС), величины уставок основных токовых защит рекомендуется принять следующими:

Уставка защиты по перегрузке рассчитывается по согласованию с рабочим током ДГУ $I_p = 60$ А.

Ток срабатывания селективной токовой отсечки (МТЗ 2-й ступени) определяется из условия отстройки от максимального рабочего тока, самозапуска и переходных процессов:

$$I \gg I_{с.з.2} = k_n k_{сзн} I_{раб.макс.} / k_ε = 1,15 \cdot 2,4 \cdot 60 / 0,99 = 167,3 А$$

где k_n – коэффициент несрабатывания (запаса) $k_n = 1,15$;

$k_ε$ – коэффициент возврата цифрового реле $k_ε = 0,99$;

$k_{сзн}$ – коэффициенту самозапуска, с учётом согласования с защитой выключателя аварийного ввода щита АВР, присваивается значение $k_{сзн} = 2,4$.

Предварительно:

- защита от перегрузок $I_R = 63$ А с заводской время-токовой характеристикой IDMT 36;
- селективная токовая отсечка $I_{sd}^{(2)} = 189$ А, $t_{sd}^{(2)} = 0,8$ с.

Чувствительность МТЗ к минимальным токам к.з. при питании щита АВР от ДГА (при $Z_{расч} < 0,65$ $I_{к мин} = I_{к∞ R}^{(3)}$)

– при $I_{к∞}^{(3)}$, $k_{ч∞}^{(3)} = 169$ А / 189 А $\approx 0,9$, что не соответствует требованиям глав 3.2, 5.3 ПУЭ [1] для эффективных токовых защит.

С учётом специфики работы генератора малой мощности на “близкие” междуфазные к.з., значение уставки селективной токовой отсечки корректируется:

$$I_{sd} = 135 \text{ А.}$$

2) - при наличии технической возможности

Тогда чувствительность МТЗ к минимальным токам к.з. при питании щита АВР от ДГА (при $Z_{расч} < 0,65$ $I_{к мин} = I_{к∞ R}^{(3)}$) определится следующим образом:

$$- \text{ при } I_{к∞}^{(3)}, k_{ч∞}^{(3)} = 169 \text{ А} / 135 \text{ А} \approx 1,3$$

| | | | | | | | |
|------|--------|------|------|-------|------|---|------|
| | | | | | | 840/ПУ-2018-Декабр-10-МК-ЭС.РР (продолжение) | Лист |
| Изм. | Кол.уч | Лист | №док | Подп. | Дата | | 5 |

$k^{(1)}_{\infty}$ соответствует требованиям глав 3.2, 5.3 ПУЭ [1] для использования в качестве резервной. Повышение чувствительности может привести к неселективному срабатыванию с аппаратами защит со стороны нагрузки или ложному срабатыванию во время пуска/самопуска электродвигателей насосных агрегатов.

Время отключения минимальных расчётных ТКЗ составит 0,8 с, что соответствует требованиям ПУЭ изд. 7 п. 1.7.79 (в системе TN, в цепях, питающих распределительные и др. щиты и щитки, допустимое время отключения не должно превышать 5 сек. при фазном напряжении в питающей сети $U_{\phi} = 220 \text{ В}$).

Выключатель защиты электродвигателя СН-1/2 рекомендуется заменить на Compact NSX100N с Micrologic 5.2A с номинальным током $I_n = 40 \text{ А}$ и следующими уставками:

- защиты от перегрузок $I_R = 0,9 \cdot I_n - 6\text{А} = 0,9 \cdot 40 - 6\text{А} = 30 \text{ А}$, $t_R = 4,0 \text{ с}$;
- селективная токовая отсечка $I_{sd}^{(3)} = 4,0 \cdot I_R = 4,0 \cdot 30 = 120 \text{ А}$, $t_{sd} = 0,0 \text{ с}$ при $I^2t - \text{«off»}$;
- токовая отсечка $I_1^{(3)} = 3,5 \cdot I_n = 140 \text{ А}$.

Время отключения минимальных расчётных ТКЗ составит не более 0,02 с, что соответствует требованиям ПУЭ изд. 7 п. 1.7.79 (в системе TN допустимое время отключения не должно превышать 0,4 сек. при фазном напряжении в питающей сети $U_{\phi} = 220 \text{ В}$).

3) – Значения уставок рассчитаны на случай питания ЭУ от ДГУ, поэтому, в случае выявления на стадии проведения пуско-наладочных работ ложных срабатываний выключателя с данными настройками электронного расцепителя во время пусков двигателя при питании от сети, следует провести следующие мероприятия:

- коррекцию уставок выключателей электродвигателя СН-1/2:
 $I_{sd} = 7,0 \cdot I_R - 10\text{А} = 7,0 \cdot 30 - 10\text{А} = 200 \text{ А}$; токовая отсечка $I_1 = 15 \cdot I_n$ (не используется);
- схемотехническую доработку как показано в чертежах 840/ПУ-2018-Декабр-10-МК-ЭС л.2;
- ввод следующих значений уставок срабатывания реле РТ-40М поз. КА1-6
 (контролируемый диапазон поков 2,5-25 А): ток отключения 50%, выдержка времени 0,2 с.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: СПО ОРГРЭС, 2002.
2. Беляев А.В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. – СПб: ПЭИпк, 2007.
3. Шабад М.А. Защита генераторов малой и средней мощности – СПб: ПЭИпк, 1999

| | | | | | | | |
|------|--------|------|------|-------|------|---|------|
| | | | | | | 840/ПУ-2018-Декабр-10-МК-ЭС.РР (продолжение) | Лист |
| Изм. | Кол.уч | Лист | №док | Подп. | Дата | | 6 |

1.4 Расчет заземляющего устройства

Требуется выполнить расчёт параметров устройства точечного заземления
нейтрали генератора ДГУ.

Сопротивление отдельного заземляющего устройства R_3 не должно превышать **4 Ом** в соответствии с требованиями п. 1.7.101 ПУЭ 7. По данным изысканий, с учетом промерзания (сведения п. 2 РД шифр 840/РУ-2018-Декабр-10-МК-КР.ПЗ на основании технического отчёта, ООО "ГеоНорд", скважина 125) принимаем удельное усредненное сопротивление грунта :
для горизонтального заземлителя - насыпные грунты, супеси со щебнем, строительный мусор
 $\rho = 300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$
для вертикального электрода $\rho = 60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ - пески мелкие, средние, средней плотности, насыщенные водой / суглинки пылеватые, ленточные, мягкопластичные, слоистые.

Для устройства заземления принимаем:
вертикальные электроды длиной **21 м** (сталь круглая, диаметр 16,0 мм);
горизонтальный заземлитель – стальная полоса сечением 6х40 мм длиной **2 м**

Сопротивление одного вертикального электрода:

$$r_B = 0,366 \left(\lg \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot t + 1}{4 \cdot t - 1} \right) / (\Delta_1 / \rho_1 + \Delta_2 / \rho_2) = \frac{0,366 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot t + 1}{4 \cdot t - 1} \right)}{\Delta_1 \cdot \rho_2 + \Delta_2 \cdot \rho_1} =$$

$$= \frac{0,366 \cdot 18000}{6120} \left(\lg \frac{2 \cdot 21}{1,00 \cdot 0,016} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 11,2 + 21}{4 \cdot 11,2 - 21} \right) = 3,9 \text{ Ом}$$

где $d = 16,0 \text{ мм}$ - диаметр стержневого электрода,

t – глубина заложения электрода равная расстоянию от поверхности земли до середины электрода.

Δ_1 - часть электрода, находящаяся в верхнем слое земли = 2 м;
 $\Delta \rho_1$ - удельное сопротивление земли в верхнем слое = 300 Ом;
 Δ_2 - часть электрода, находящаяся в нижнем слое земли = 20 м;
 $\Delta \rho_2$ - удельное сопротивление земли в нижнем слое = 60 Ом.

Для соединения заземляющего устройства с металлическими конструкциями системы выравнивания потенциалов и ГЗШ ближайшего стационарного сооружения исп. стальная соединит. полоса.

Сопротивление 2-х соединительных полос:

общая длина конструктивно составляет $L = 2 \text{ м}$

$$r_r = \frac{0,366 \cdot \rho}{l} \lg \frac{2 \cdot l^2}{b \cdot t} =$$

$$= \frac{0,366 \cdot 300}{2} \cdot \lg \frac{2 \cdot (2)^2}{0,04 \cdot 0,7} = 134,8 \text{ Ом}$$

где: t – глубина заложения стальной полосы, м; b – ширина полосы, м.

Общее сопротивление заземляющего

устройства составит:

$$R_3 = \frac{r_B \cdot r_r}{r_B + r_r} = \frac{3,9 \cdot 134,8}{3,9 + 134,8} = 3,8076 \text{ Ом}$$

Влияние соединительной полосы на общее сопротивление проектируемого заземляющего устройства не учитывается, т.к. возможное увеличение общего сопротивления из-за взаимного влияния распределения электрических полей компенсируется уменьшением за счёт увеличения контактной поверхности стекания тока "на землю".

Для обеспечения значения R_3 не более **4,0 Ом** достаточно одного вертикального электрода.

По конструктивным особенностям заземляющее устройство выполняется с использованием 1-го вертикального электрода.

| | | | | | | | |
|------|---------|------|--------|---------|------|---|-----------|
| | | | | | | 840/РУ-2018-Декабр-10-МК-ЭС.РР (окончание) | Лист 7 |
| Изм. | Кол.уч. | Лист | № док. | Подпись | Дата | | |

Список литературы

1. Беляев А.В. Выбор аппаратуры защит и кабелей в сетях 0,4 кВ.
2. Правила устройства установок. ПУЭ изд.6 с изм. и доп., изд. 7.
3. ГОСТ Р 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ.
4. Карпов Ф.Ф. Справочник по расчёту кабелей и проводов.

| | | | | | | | |
|------|---------|------|-------|---------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | | 840/ПУ-2018-Декабр-10-МК-ЭС.РР | Лист |
| | | | | | | (окончание) | 8 |
| Изм. | Кол.уч. | Лист | №док. | Подпись | Дата | Расчеты (окончание) | |