

Облакевич С. В.

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ ЗАПИТЫВАЕМОЙ ОТ АВТОНОМНОЙ ДЭС

Частное научно-производственное предприятие "Синапс", г. Киев, www.sinapse.ua

Состояние вопроса

Одной из достаточно важных проблем, практически в равной степени относящейся и к электро-снабжению и к электроприводу, на протяжении многих лет была и остается проблема обеспечения плавного запуска двигателей. Тем не менее, несмотря на достаточно широкое применение самых разнообразных устройств плавного пуска электродвигателей, в настоящее время наиболее используемым способом все же остается прямое включение. Особое значение эта проблема приобретает в локальных автономных или резервно-аварийных системах электроснабжения. К примеру, повышенные требования к надежности электро-снабжения таких ответственных электроприемников как: пожарные насосы, системы дымоудаления, пожарные лифты и прочие, обуславливают необходимость применения третьего независимого источника электроснабжения. В качестве такого источника обычно применяют дизельные электростанции (ДЭС) соответствующей мощности. Частично поставленные вопросы применительно к расчету мощности ДЭС, работающей совместно с агрегатами бесперебойного питания (АБП) рассмотрены в работе [1].

Область применения ДЭС и количество внедренных автономных электростанций непрерывно расширяется. Однако, несмотря на широкое применение ДЭС для питания упомянутых выше и многих других двигательных нагрузок, вопросы обоснованного выбора мощности ДЭС до сих пор во многом остаются не решенными. Прежде всего, это касается необходимости учета реальных характеристик используемых в ДЭС синхронных электрогенераторов и систем их возбуждения и регулирования напряжения.

В случае выбора мощности ДЭС равной не номинальной мощности пускаемого двигателя (естественно, с определенным коэффициентом запаса), а большей или равной пусковой мощности двигателя проблем при его пуске не будет. В тоже время, это однозначно приведет к очень значительному завышению мощности ДЭС и эксплуатации ее с низким коэффициентом использования. Негативные экономические последствия этого достаточно очевидны. Постоянный недогруз в свою очередь, приводит к уменьшению ресурса дизельного двигателя из-за сильной карбонизации, вызванной скоплением в цилиндрах несгоревших газов и необоснованным затратам на эксплуатацию ДЭС, вплоть до ее замены и необходимости приобретения новой. Поэтому большое практическое значение имеет определение расчетной экономически обоснованная (со всех точек зрения желательна минимальная) мощность ДЭС. Решение этого вопроса, требует детального рассмотрения и количественной оценки процессов, происходящих при пуске асинхронного двигателя от автономного синхронного генератора. При этом последовательно рассмотрим два основных аспекта. Первый из них – оценка допустимого минимального напряжения на зажимах электродвигателя, при котором возможен прямой пуск. Второй – методика определения предельно допустимой мощности двигателя при пуске от ДЭС без учета и с учетом питающей линии двигатель - ДЭС.

Оценка допустимого минимального напряжения на зажимах электродвигателя

Как следует из [2] возможность прямого пуска короткозамкнутого двигателя определяется из условия:

$$U_{\text{дв}^*} \geq \sqrt{\frac{1,1 m_{\text{мех}} K_3}{m_n}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{дв}^*}$ - напряжение на зажимах электродвигателя в долях номинального напряжения;

$m_{\text{мех}} = M_{\text{мех}}/M_{\text{ном}}$ – требуемая кратность начального момента приводного механизма;

$m_n = M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$ – кратность пускового (начального) момента электродвигателя (по каталогу);

K_3 – коэффициент загрузки электродвигателя;

1,1 – коэффициент запаса.

При определении значений кратности начальных моментов некоторых механизмов $m_{\text{мех}}$ можно руководствоваться данными приведенными в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициента $m_{\text{мех}}$

Вид механизма	$m_{мех}$
Вентиляторы	0,4 . . . 0,5
Компрессоры центробежные и поршневые	0,4
Насосы центробежные и поршневые	0,4
Лифты пассажирские и грузовые	1,7 . . . 1,8
Станки металлообрабатывающие	0,3

Пример 1

а) Требуется определить напряжение необходимое для пуска двигателя пассажирского лифта с электродвигателем старой серии АСМ 52-6 мощностью 4,5 кВт. Параметры двигателя: $I_{ном.дв} = 12A$; $K_i = 4,5$; $m_n = 2,2$; $m_{max} = 2,3$. По формуле (1) расчет дает значение:

$$U_{дв*} \geq \sqrt{\frac{1,1 \cdot 1,8 \cdot 1}{2,2}} = 0,95$$

б) В тоже время для новых двухскоростных двигателей серий 5АН180S4/16 мощностью 5 кВт с параметрами $I_{ном.дв} = 11,6A$; $K_i = 6,5$; $m_n = 2,8$; $m_{max} = 3,6$ расчет дает значение:

$$U_{дв*} \geq \sqrt{\frac{1,1 \cdot 1,8 \cdot 1}{2,8}} = 0,84$$

Т.е. величина напряжения при пуске на зажимах на зажимах электродвигателя в этом случае не должна быть менее 84% от номинального.

в) Заметим, что насосное оборудование, как правило, позволяет иметь величину напряжения необходимого для успешного пуска двигателя еще более низкое. Так, в насосном агрегате мощностью 55 кВт станции пожаротушения с двигателем 4А225М4УЗ с параметрами: $I_{ном.дв} = 100A$; $K_i = 7$; $m_n = 1,3$; $m_{max} = 2,5$ расчет дает значение:

$$U_{дв*} \geq \sqrt{\frac{1,1 \cdot 0,4 \cdot 1}{1,3}} \approx 0,6$$

Т.е. величина напряжения при пуске на зажимах на зажимах электродвигателя в этом случае должна быть более 60% номинального напряжения.

Определение напряжения и допустимой мощности двигателей в условиях пуска от ДЭС

Решение вопроса о предельно допустимой мощности двигателя по условиям самозапуска определяется величиной допустимого снижения напряжения на зажимах двигателя и на шинах, от которых питаются другие электроприемники. При этом, как было показано ранее, напряжение должно быть достаточным, чтобы обеспечить положительный избыточный момент в течении всего процесса разгона.

Для определения напряжения в различных точках сети рассмотрим расчетную схему, изображенную на рис.1.

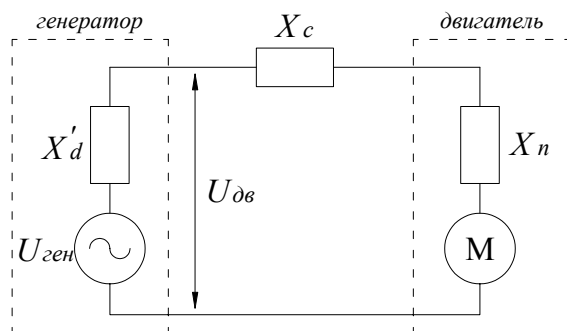


Рис. 1. Схема замещения синхронного генератора и двигателя

Как следует из [3] при питании двигателя от генератора, имеющего мощность, одного порядка с мощностью включаемого двигателя, процесс изменения напряжения происходит следующим образом: в первый момент времени после включения двигателя напряжение на шинах генератора сразу уменьшается вследствие потери напряжения в переходном реактивном сопротивлении x'_d (сверхпереходными процессами и сверхпереходным сопротивлением x''_d в данном случае можно пренебречь, поскольку их длительность много меньше времени пуска двигателя). В дальнейшем система автоматического регулирования возбуж-

дения генератора увеличивает ток возбуждения, при этом напряжение генератора при установившемся режиме будет выше начального значения напряжения генератора в момент пуска двигателя, через время необходимое для выхода двигателя на номинальный режим система автоматического регулирования возбуждения генератора установит такой ток возбуждения, который будет соответствовать номинальному напряжению генератора.

При пренебрежении падением напряжения на питающей двигатель линии ($X_c = 0$) начальное напряжение на двигателе определяется как:

$$U_{нач.дв} = \frac{U_{ген} \cdot x_n}{x'_d + x_n}, \quad (2)$$

где $U_{ген}$ – напряжение генератора, определяемое его начальной ЭДС;

x'_d – переходное реактивное сопротивление генератора;

x_n – пусковое (переходное) сопротивление двигателя.

Принимая, что начальная переходная ЭДС генератора равна его номинальному напряжению из (2) при $U_{дв*} = U_{нач.дв} / U_{ном.дв}$ и принимая $U_{ном.дв} = U_{ген} = U_{ном}$ получим

$$x_{n*} = \frac{U_{дв*} x'_d}{1 - U_{дв*}}. \quad (3)$$

С другой стороны пусковое сопротивление двигателя можно записать как:

$$x_n = \frac{U_{дв}^2}{S_{н.дв}}, \quad (4)$$

где $S_{н.дв} = S_{ном.дв} K_i$ – полная пусковая мощность двигателя, кВт·А;

K_i – кратность пускового тока двигателя (из справочных данных),

или принимая за базисную мощность – мощность генератора и базисное напряжение $U_{ген} = U_{ном}$ получаем в относительных единицах пусковое сопротивление двигателя как:

$$x_{n*} = \frac{S_{ген}}{S_{н.дв}} \left(\frac{U_{ном.дв}}{U_{ген}} \right)^2. \quad (5)$$

Таким образом, из выражений (3) и (5) можно получить общую допустимую мощность двигательной нагрузки при питании от автономного генератора:

$$P_{ном.дв} = \frac{S_{ген} \eta_{дв} \cos \varphi_{ном.дв}}{\left(\frac{U_{дв*} x'_d}{1 - U_{дв*}} \right) K_i}, \text{ кВт} \quad (6)$$

где $P_{ном.дв}$ – допустимая мощность двигателя, кВт;

$S_{ген}$ – номинальная мощность ДЭС, кВт·А;

$\eta_{дв} \cos \varphi_{ном.дв}$ – произведение к.п.д. двигателя на номинальный коэффициент мощности. С достаточной для практических расчетов точностью можно принимать $\eta_{дв} \cos \varphi_{ном.дв} = 0,85$.

К сожалению, использование полученного выражения (6) для инженерных расчетов даст завышенное значение допустимой мощности двигателя, поскольку при выводе выражения предполагалось, что система автоматического регулирования возбуждения генератора может увеличивать ток возбуждения до любого значения необходимого для пуска двигателя. В реальной ДЭС реализовать это, как правило, не возможно, поскольку безщеточная система возбуждения синхронного генератора может увеличивать ток возбуждения только в определенном диапазоне и только до определенных значений, определяемых конструкцией генератора, его изоляцией и типом/серией применяемого устройства автоматического регулирования напряжения (AVR*).

* Automatic Voltage Regulator (AVR) в англоязычной литературе.

Поэтому для реальных инженерных расчетов проектировщикам рекомендуется использовать методику проверки допустимой мощности двигателя для предварительно выбранного генератора и при необходимости уточнением ее величины путем последовательных итераций для разных мощностей генераторов.

Задав величину напряжения необходимую для пуска двигателя $U_{\partial в}^*$ и используя выражение, полученное из (5) можно определить допустимую мощность двигательной нагрузки при питании от автономного генератора как:

$$P_{ном. \partial в} = \left(\frac{S_{п. \partial в}}{S_{ген}} \right) \frac{S_{ген} \eta_{\partial в} \cos \varphi_{ном. \partial в}}{K_i}, \text{ кВт}, \quad (7)$$

где $S_{п. \partial в}$ определяется из кривых $\Delta U\% = f(S_{п. \partial в})^{**}$ завода-изготовителя для выбранной ДЭС определенной мощности с конкретной системой возбуждения и устройством/типом AVR..

Пример 2

а) Требуется определить возможность пуска двигателя пассажирского лифта с электродвигателем мощностью 5 кВт, параметры которого приведены в Примере 1б от автономной дизельной электростанции мощностью 40 кВт·А типа ВСJD40Р (завод изготовитель Broadcrown, Великобритания). Кривые генератора для данного дизель-генератора с двумя наиболее распространенными сериями устройств AVR приведены на Рис.2.

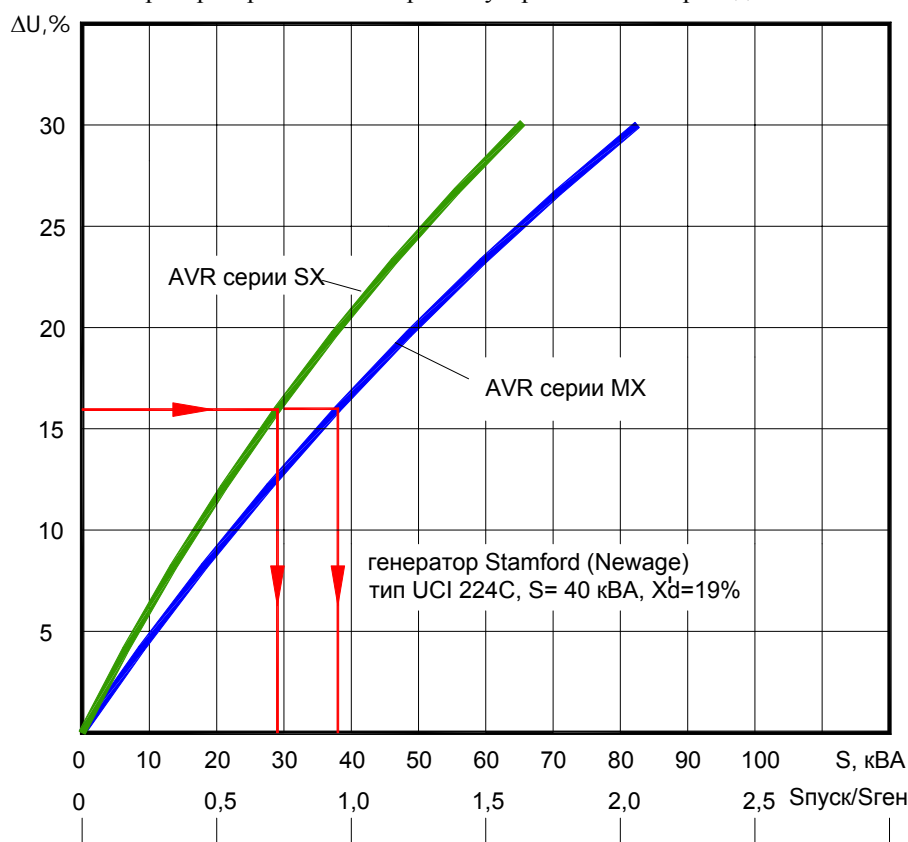


Рис.2.

Как было рассчитано в примере 1б необходимое напряжения для пуска данного двигателя составляет значение $U_{\partial в}^* = 0,84$, т.е. $\Delta U\% = 1 - 0,84 = 16\%$. Из кривой Рис.2 получаем два значения:

$S_{п. \partial в} = 29 \text{ кВт·А}$ для AVR серии SX;

$S_{п. \partial в} = 38 \text{ кВт·А}$ для AVR серии MX;

Откуда расчетом по формуле (7) находим:

$P_{ном. \partial в} = 3,8 \text{ кВт}$ для AVR серии SX;

$P_{ном. \partial в} = 5,0 \text{ кВт}$ для AVR серии MX.

Таким образом ДЭС мощностью 40 кВт·А обеспечит пуск двигателя лифта только при использовании AVR серии MX.

б) Требуется определить возможность пуска двигателя насосного агрегата мощностью 55 кВт станции пожаротушения, параметры которого приведены в Примере 1в от автономной дизельной электростанции мощностью 140 кВт·А типа ВСJD 140Р (завод изготовитель Broadcrown, Великобритания). Кривые генератора для данного дизель-генератора с двумя наиболее распространенными сериями устройств AVR приведены на Рис.3.

^{**} в англоязычной литературе кривые имеют название Locked Rotor Motor Starting Curve.

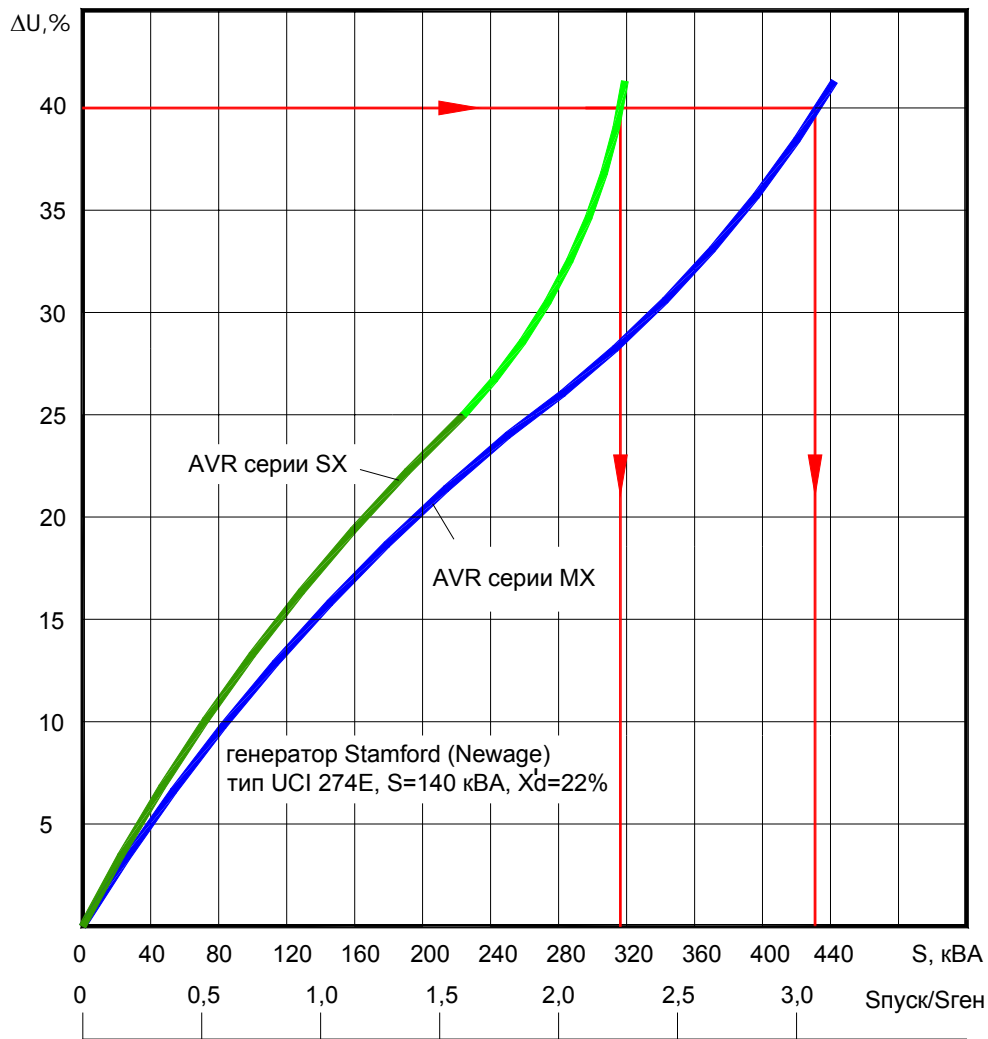


Рис.3.

Как было рассчитано в примере 1в необходимое напряжения для пуска данного двигателя составляет значение $U_{\partial\partial}^* = 0,6$, т.е. $\Delta U\% = 1 - 0,6 = 40\%$. Из кривой Рис.3 получаем два значения:

$S_{п.дв} = 316 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ для AVR серии SX;

$S_{п.дв} = 431 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ для AVR серии MX;

Откуда расчетом по формуле (7) находим:

$P_{ном.дв} = 44 \text{ кВт}$ для AVR серии SX;

$P_{ном.дв} = 60 \text{ кВт}$ для AVR серии MX.

Таким образом ДЭС мощностью 140 кВ·А обеспечит пуск двигателя насоса только при использовании AVR серии MX.

Учет падения напряжения в питающих линиях

Следует заметить, что напряжение на выходе генератора должно быть выше напряжения на клеммах двигателя при нормальной его работе для того, чтобы покрыть потерю напряжения в питающих двигательную нагрузку линиях. В противном случае напряжение на шинах, к которым подключены электроприемники (двигательная нагрузка) будет меньше номинального, что недопустимо. Очень часто это важное обстоятельство не учитывается, и расчет ошибочно производится по допустимой потере напряжения в сопротивлении X_c (Рис.1) при номинальном токе нагрузки.

Мы не будем подробно рассматривать вопрос расчета дополнительной потери напряжения при пуске электродвигателя, который достаточно полно освещен в [2, 4, 5]. Приведем только достаточно точную инженерную методику расчета из [6], согласно которой:

$$\Delta U_{доп} \% = \frac{k I_{ном.дв} K_i L}{U_{ном}}, \quad (8)$$

где $\Delta U_{доп} \%$ - дополнительная потеря напряжения при пуске электродвигателя;

k - коэффициент, учитывающий потерю напряжения с учетом коэффициента мощности при пуске электродвигателя, В/(А·км), определяемый по Табл.2;

$I_{ном.дв}$ - номинальный ток двигателя, А;

L – длина питающей линии, км.

Таблица 2. Значения коэффициента k , [В/(А·км)] для различной нагрузки.

Сечение питающей линии, мм ²		Двигательная нагрузка		Осветительная нагрузка
медь	алюминий	нормальный режим	пуск	
		$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 0,35$	$\cos \varphi = 1$
1,5		20	9,4	25
2,5		12	5,7	15
4		8	3,6	9,5
6	10	5,3	2,5	6,2
10	16	3,2	1,5	3,6
16	25	2,05	1	2,4
25	35	1,3	0,65	1,5
35	50	1	0,52	1,1
50	70	0,75	0,41	0,77
70	120	0,56	0,32	0,55
95	150	0,42	0,26	0,4
120	185	0,34	0,23	0,31
150	240	0,29	0,21	0,27
185	300	0,25	0,19	0,2
240	400	0,21	0,17	0,16
300	500	0,18	0,16	0,13

Таким образом, задав величину напряжения необходимую для пуска двигателя с учетом дополнительной потери напряжения на питающей линии $U_{дв*} + \Delta U_{дон} \%$ и используя выражение (7) определяем допустимую мощность двигательной нагрузки при питании от автономного генератора.

Пример 3.

а) Требуется определить возможность пуска двигателя пассажирского лифта с электродвигателем мощностью 5 кВт, параметры которого приведены в Примере 1б от автономной дизельной электростанции мощностью 60 кВт·А типа ВСJD 60Р (завод изготовитель Broadcrown, Великобритания) при условии, что питающая линия выполнена кабелем ВВГ 4×16 длиной 200 м. Кривые генератора для данного дизель-генератора с двумя наиболее распространенными сериями устройств AVR приведены на Рис.4.

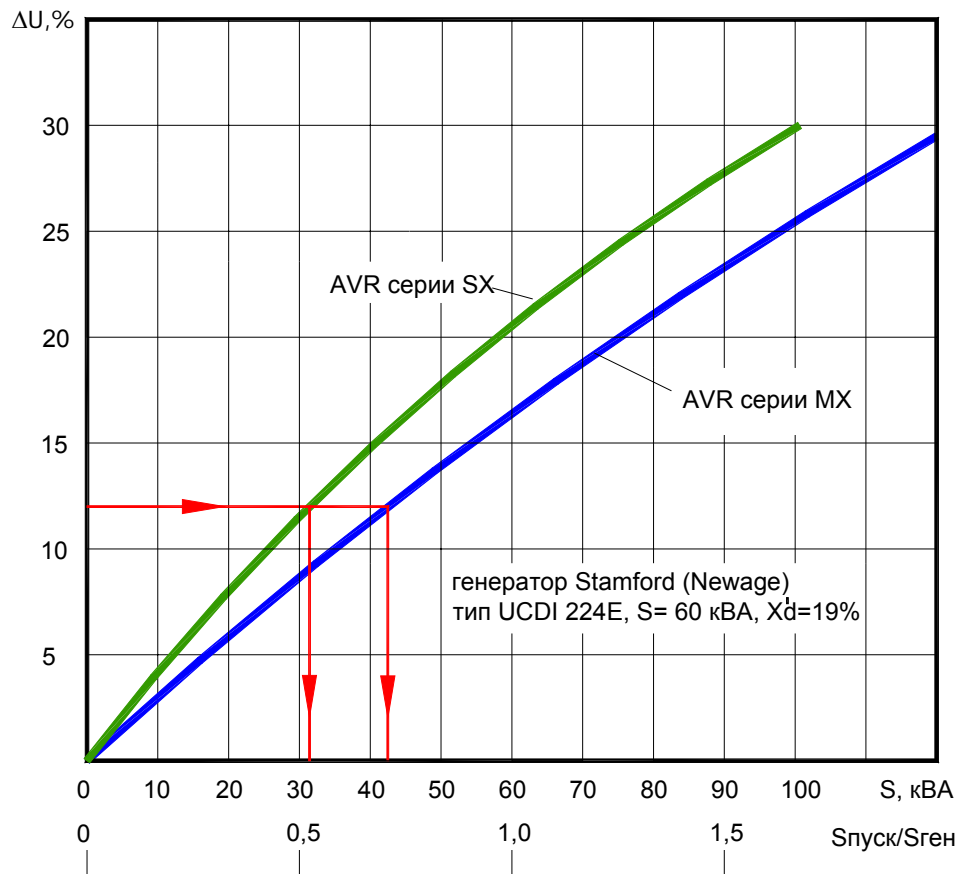


Рис.4.

Расчет по формуле (8) дает значение $\Delta U_{\text{доп}} \% = 1 \times 11,6 \times 6,5 \times 0,2 / 380 = 4 \%$, т.е. $\Delta U \% = 1 - 0,84 - 0,04 = 12\%$. Из кривой Рис.4 получаем два значения:

$$S_{\text{н.дв}} = 31 \text{ кВ} \cdot \text{А для AVR серии SX};$$

$$S_{\text{н.дв}} = 42 \text{ кВ} \cdot \text{А для AVR серии MX};$$

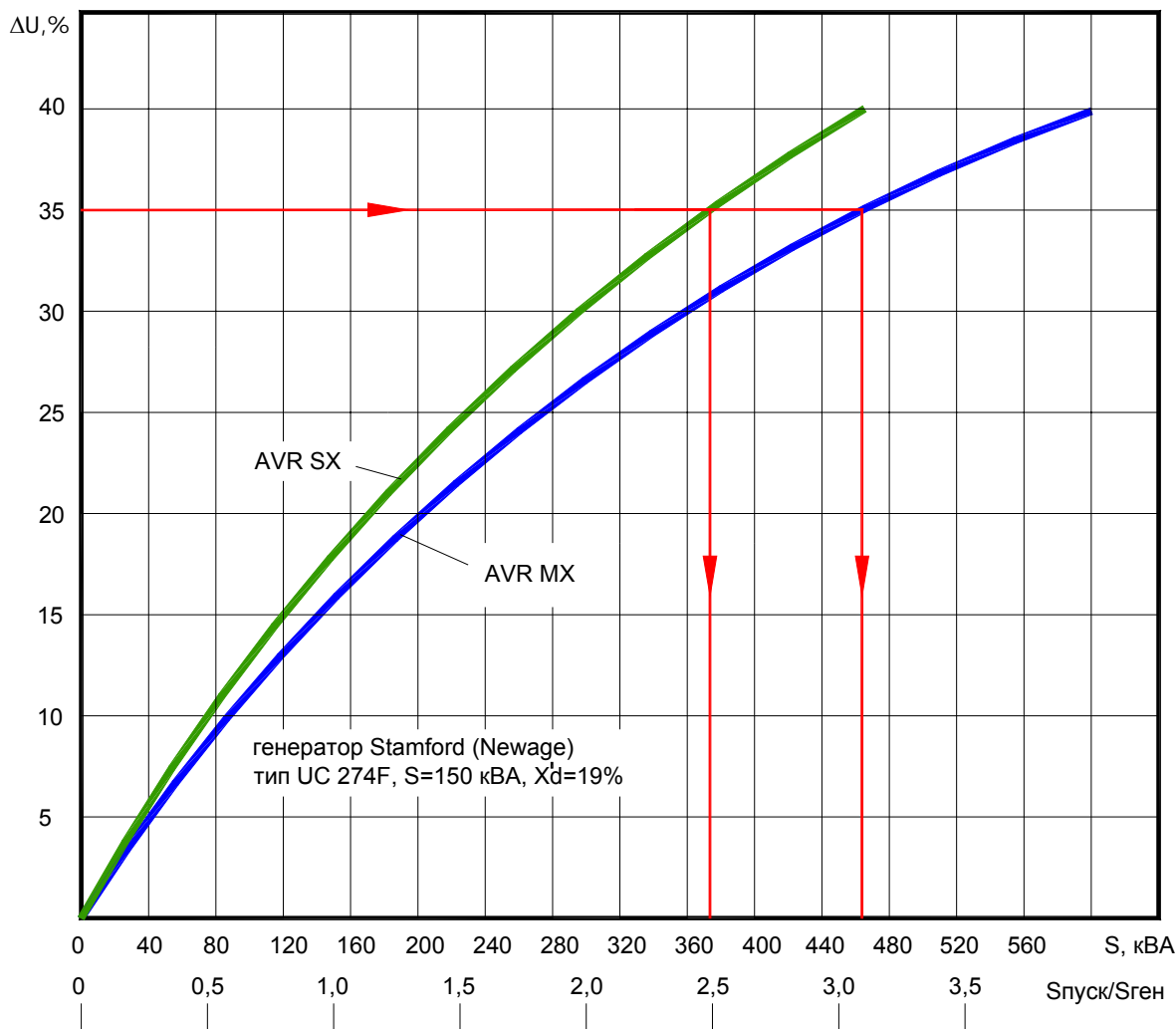
Откуда расчетом по формуле (7) находим:

$$P_{\text{ном.дв}} = 4,1 \text{ кВт для AVR серии SX};$$

$$P_{\text{ном.дв}} = 5,5 \text{ кВт для AVR серии MX}.$$

Таким образом ДЭС мощностью 60 кВ·А обеспечит пуск двигателя лифта при длине питающей линии 200 м только при использовании AVR серии MX.

б) Требуется определить возможность пуска двигателя насосного агрегата мощностью 55 кВт станции пожаротушения, параметры которого приведены в Примере 1в от автономной дизельной электростанции мощностью 150 кВ·А типа BCJD 150P (завод изготовитель Broadcrown, Великобритания) при условии, что питающая линия выполнена кабелем ВВГ 4×185 длиной 150 м (выбрана по моменту для нормального падения напряжения 2,5% по [4]). Кривые генератора для данного дизель-генератора с двумя наиболее распространенными сериями устройств AVR приведены на Рис.5.



Расчет по формуле (8) дает значение $\Delta U_{доп} \% = 0,19 \times 100 \times 7 \times 0,15 / 380 = 5,25 \%$, т.е. $\Delta U \% = 1 - 0,6 - 0,05 = 35\%$. Из кривой Рис.5 получаем два значения:

$S_{н.дв} = 374 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ для AVR серии SX;

$S_{н.дв} = 464 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ для AVR серии MX;

Откуда расчетом по формуле (7) находим:

$P_{ном.дв} = 45 \text{ кВт}$ для AVR серии SX;

$P_{ном.дв} = 56 \text{ кВт}$ для AVR серии MX.

Таким образом ДЭС мощностью 150 кВ·А обеспечит пуск двигателя насоса при длине питающей линии 150 м только при использовании AVR серии MX.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Облакевич С.В.* К расчету мощности ДЭС, работающей совместно с АБП. “Промислова електроенергетика та електротехніка” Промелектро, №2, 2005 г.
2. *Тульчин И.К., Нудлер Г.И.* Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий. – М.: Энергоатомиздат, 1990.-480 с.
3. *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Мамикоянца.-М.: Энергоатомиздат, 1984. - 240с.
4. *Шаповалов И.Ф.* Справочник по расчету электрических сетей. – К.: Будівельник, 1986. - 224с.
5. *Дьяков В.И.* Типовые расчеты по электрооборудованию: Практ. пособие. - М.: Высшая школа, 1991. - 160с.
6. *Electrical Installation Guide.* According to IEC International Standards. Second edition, 2005. Conseil © Schneider Electric.