

УДК 621.31

Облакевич С. В.

К РАСЧЕТУ МОЩНОСТИ ДЭС, РАБОТАЮЩЕЙ СОВМЕСТНО С АБП

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

Состояние вопроса

Достаточно точный расчет и обоснованный выбор мощности и типа источников питания во многом обуславливают показатели надежности электроснабжения и качества электроэнергии, а также обуславливают экономичность и инвестиционную привлекательность проектируемых электросетей [1-3]. Поэтому большое практическое значение имеет наличие и использование соответствующих методических материалов. Особое значение имеет использование таких материалов в случае применения электроприемников так называемой критической группы (ЭКГ) по надежности электроснабжения [4-6].

Известно, что обеспечение требуемого качества и надежности электропитания информационных технологий, локальных вычислительных сетей и систем (ЛВС), а также отдельных ответственных объектов, содержащих ЭКГ, представляет сложную комплексную задачу. Это во многом обусловлено, с одной стороны, использованием специфических принципов построения схем электропитания, а с другой, характером процессов энергообмена в системах, содержащих устройства силовой электроники [7]. Кардинально решается указанная задача только путем создания системы гарантированного электроснабжения (СГЭ) с использованием специального оборудования и особой схемы построения силовой распределительной сети.

В состав оборудования такой СГЭ входят агрегат бесперебойного питания (АБП) определенной конфигурации, дизельная электростанция (ДЭС), включающая в себя электрогенератор, как правило, синхронный, коммутационно-распределительное оборудование, а также система заземления и грозозащиты. Именно в последние годы общепринятым стало применение для защиты ЛВС и отдельных ответственных объектов от возможных неполадок электропитания не только единичных АБП и ДЭС, но и довольно мощных СГЭ. Однако, несмотря на довольно широкое применение названных технических решений, вопросы обоснованного выбора мощности ДЭС с учетом реальных режимов эксплуатации, до сих пор во многом остаются не решенными.

При рассмотрении указанной задачи следует учесть, что традиционные методики выбора мощности ДЭС, питающей АБП, иными словами применительно к системе «ДЭС-АБП», исходят из допущения о том, что все электрические нагрузки являются линейными. Эти методики достаточно полно рассмотрены в ряде публикаций [8-10]. Наряду с этим, нельзя не отметить, что проблема учета влияния нелинейных нагрузок потребителей в компьютерных сетях на работу электрогенераторов ДЭС с учетом токов высших гармоник, вызванных этими нагрузками, также активно обсуждается в настоящее время [11-14]. Тем не менее, приводимые в различных источниках данные в части количественной оценки влияния высших гармоник на тепловые режимы работы таких ДЭС, основной нагрузкой которых являются АБП, существенно отличаются.

Поэтому возникает необходимость более детального рассмотрения и количественной оценки влияния токов высших гармоник на тепловые режимы работы синхронного генератора и уточнения с учетом этого фактора методики расчета мощности ДЭС, работающей в системе «ДЭС – АБП». При этом последовательно рассмотрим два основных вопроса. Первый из них – это качественная и количественная оценка влияния

высших гармоник на тепловые режимы работы синхронного генератора ДЭС. Второй, не менее важный вопрос – это обоснование методики расчета мощности ДЭС, работающей в системе «ДЭС-АБП».

Оценка влияния высших гармоник на тепловые режимы работы синхронного генератора ДЭС

Производимые серийные ДЭС предназначены для питания преимущественно активно-индуктивной нагрузки, которая потребляет ток синусоидальной формы с небольшим коэффициентом нелинейных искажений. Так, межгосударственный стандарт ГОСТ 23377-78 (МЭК 34-1) устанавливает для производителей ДЭС, что коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения трехфазного генератора должен соответствовать значениям, выбираемым из ряда 5; 10; 16%. При этом одним из основных критериев работоспособности синхронных генераторов является температура нагрева изоляции обмоток, т.е. рабочая температура изоляции, которая должна быть меньше допустимой. В нормальных условиях работы генератора допустимая предельная температура обмоток определяется классом нагревостойкости изоляции и рассчитывается исходя из допущения о линейности нагрузок. Между тем в системе «ДЭС – АБП» именно АБП выступает в качестве нагрузки на генератор, причем эта нагрузка имеет существенно нелинейный характер из-за наличия импульсных схем выпрямителя [15, 16].

Предложенное работе [17] решение с учетом нелинейности характера АБП по определению коэффициента избыточности мощности ДЭС над мощностью АБП достаточно затруднительно. Это обусловлено тем, что точные значения входных сверхпереходных индуктивных сопротивлений выпрямительных устройств АБП не известны, а их величины изготовители АБП, не приводят. Кроме того, в реальной сети, как показано в [13], имеют значение режимы работы и тип электронных компонент выпрямителя, полные сопротивления линий связи и ряд других факторов, учесть которые практически не возможно.

В действительности оценить коэффициент избыточности мощности ДЭС над мощностью АБП, обозначим его как $K_{им}$, можно достаточно просто. Исходим из того, что коэффициент $K_{им}$ – это отношение дополнительных потерь мощности в цепях и стали (ротора и статора) в реальном режиме, вызванных высшими гармониками тока и напряжения, которые обычно известны или достаточно просто определяются, к потерям мощности при нормальном режиме работы ДЭС на линейную нагрузку. С целью определения коэффициента $K_{им}$ выполним последовательно ряд операций:

1. Определяем общие потери в синхронном генераторе при номинальной нагрузке (эти потери и все их составляющие выражены в ваттах)

$$\sum P = P_{\Sigma} + P_{\text{в}} + P_{\text{а}} + P_{\text{з}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{пов}} + P_{\text{доб}}, \quad (1)$$

где P_{Σ} – основные электрические потери в обмотке статора;

$P_{\text{в}}$ – потери на возбуждение;

$P_{\text{а}}$ – магнитные потери в ярме магнитопровода статора;

$P_{\text{з}}$ – магнитные потери в зубцах магнитопровода статора;

$P_{\text{мех}}$ – механические потери, равные сумме потерь в подшипниках и на вентиляцию;

$P_{\text{пов}}$ – поверхностные потери полюсных наконечников статора;

$P_{доб}$ – добавочные потери в обмотках ротора от высших гармонических магнитного поля якоря.

В силу очень слабо выраженной зависимости потерь на возбуждение $P_{в}$ и механических потерь $P_{мех}$ от наличия и величины высших гармоник тока и напряжения статора ими в рассмотрении пренебрегаем. Также можно не учитывать и зависимость добавочных потерь в обмотках ротора $P_{доб}$ от пространственных высших гармонических магнитного поля якоря.

Важно заметить, что в реальных электрических машинах в воздушном зазоре наряду с основной гармоникой имеется бесконечное число гармоник поля. В связи с тем, что эти гармоники имеют частоты выше основной частоты сети, т.е. 50 Гц, их принято называть высшими гармониками, которые в свою очередь разделяют на временные и пространственные. Временные — это те гармоники, которые создаются в воздушном зазоре генератора при протекании тока со стороны его выводов, пространственные — это гармоники, обуславливаемые конструктивными особенностями и нелинейностью параметров самой электрической машины. В интересующем нас случае автономной работы ДЭС на нелинейную нагрузку основным источником высших временных гармоник является - АБП, при этом значениями высших пространственных гармоник можно пренебречь.

2. Рассчитываем основные электрические потери в обмотке трехфазного статора [19]

$$P_{\phi} = 3I_{\phi}^2 r 10^{-3}, \quad (2)$$

где I_{ϕ} - номинальный фазный ток статора, А;

r – сопротивление обмотки, Ом.

3. Определяем магнитные потери в ярме магнитопровода статора

$$P_a = k_a p_{1/50} B_a^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} m_a 10^{-3}, \quad (3)$$

где k_a – коэффициент, учитывающий увеличение потерь из-за частичного замыкания листов стали, и изменения структуры стали при штамповке;

$p_{1/50}$ – удельные потери в стали при индукции 1 Тл и частоте 50Гц, Вт/кГ;

B_a - индукция в ярме статора, Тл;

m_a - масса ярма магнитопровода статора, кг.

4. Вычисляем магнитные потери в зубцах магнитопровода статора

$$P_z = k_z p_{1/50} B_z^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} m_z 10^{-3}, \quad (4)$$

где k_z – коэффициент, учитывающий увеличение потерь из-за частичного замыкания листов стали, и изменения структуры стали при штамповке;

B_z - индукция в зубце статора, Тл;

m_z - масса зубцов статора, кг.

5. Определяем поверхностные потери полюсных наконечников статора

$$P_{ПОВ} = 0,5 \cdot 2p\alpha t_1 k_0 \left(\frac{Zn}{10000} \right)^{1,5} (B_0 t_1 10^3)^2 10^{-3}, \quad (5)$$

где p - число пар полюсов;

α - коэффициент полюсного перекрытия;

$\tau = \pi D / 2p$ - полюсное деление, м;

l_1 - длина статора, м;

k_0 - коэффициент, учитывающий толщину листов стали;

Z - число зубцов статора;

n - число оборотов, мин⁻¹;

B_0 - индукция, Тл;

t_1 - зубцовое деление статора, м;

6. Переходя в относительные величины для различных временных верхних гармоник выражение потерь синхронного генератора (1) с учетом (2-5) и считая $B_0 \cong B_z \cong B_a \cong B$ можно представить в виде:

$$\frac{\Sigma P_n^*}{\Sigma P_1} = \Sigma (I_n^{*2} + B_n^{*2} (2n^{1,3} + 1)), \quad (6)$$

где n - номер высшей временной гармоники;

ΣP_n - потери синхронного генератора на n -ой гармонике;

ΣP_1 - потери синхронного генератора на 1-ой гармонике, т.е. обычные потери для линейной нагрузки, на которые он рассчитан при номинальной нагрузке;

$I_n^* = \frac{I_n}{I_1}$ - коэффициент n -ой гармонической составляющей тока статора;

I_1 - действующее значение тока основной частоты;

$B_n^* = \frac{B_n}{B_1}$ - коэффициент n -ой гармонической составляющей индукции статора;

B_1 - действующее значение индукции основной частоты.

7. Значение индукции n -ой гармоники для генератора, работающего на нелинейную нагрузку, можно определить, рассмотрев схему замещения синхронного генератора для n -ой гармоники представленную на рис.1. При этом напряжение на зажимах генератора для n -ой гармоники U_n , %, определяется как

$$U_n^* = nx_d^n I_n^*, \quad (7)$$

где n - номер высшей временной гармоники;

x_d^n - сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси, %;

x_c - индуктивное сопротивление проводников, %.

8. Э.д.с. n -ой гармоники определим, зная значения $U_n^* \cong E_n^*$ [20]

$$E_n = 2\sqrt{2}\tau_n l_1 w k_{обм} f_n B_n, \quad (8)$$

где $\tau_n = \tau/n$ – полюсное деление n -ой гармоники;

$k_{обм}$ - обмоточный коэффициент;

w – число последовательно соединенных витков обмотки;

$f_n = n \cdot f_1$ - частота n -ой гармоники.

9. Значение n -ой гармонической составляющей индукции статора учетом этого легко определить как

$$B_n^* = \frac{E_n}{E_1} = E_n^*. \quad (9)$$

10. Отношение дополнительных потерь синхронного генератора, вызванных временными верхними гармониками, к обычным потерям при линейной нагрузке, получит вид:

$$K = \Sigma P_n^* = \Sigma (I_n^{*2} (1 + n^2 x_d''^2 (2n^{1,3} + 1))) \cong \Sigma (I_n^{*2} (1 + 2n^2 x_d''^{3,3})). \quad (10)$$

Значения коэффициента n -ой гармонической составляющей тока для различных схемных решений выпрямительного устройства АБП по данным [12, 13], приведены в табл.1.

Таблица 1. Значения коэффициента n -ой гармонической составляющей тока, I_n^* , %.

Вид и элементная база выпрямительного устройства	Номер высшей временной гармоники, n					
	5	7	11	13	17	19
Тиристорная 6-ти импульсная	33	2,7	7,3	1,6	2,6	1,1
Тиристорная 12-ти импульсная	1	1	7	1	1	2
Тиристорная 12-ти импульсная с фильтром корректором	1	1	5	3	0	0
Тиристорная 12-ти импульсная с бустером	5,5	1,7	1,2	1,1	0,9	0,5
IGBT выпрямитель	0,8	1	0	0	1	1,4

Значения сверхпереходного индуктивного сопротивления по продольной оси генератора ДЭС марок F.G.Wilson (Leroy Somer), SDMO (Leroy Somer, Newage), Broadcrown (Newage), которые наиболее распространены в Украине и большинстве других стран СНГ, приведены в табл.2.

Таблица 2. Значения сверхпереходного индуктивного сопротивления генераторов по продольной оси, x_d'' , %

Фирма-изготовитель генератора	Значения x_d'' , %, при полной мощности генератора, кВ·А									
	60	100	200	250	300	350	400	500	600	800
Leroy Somer	5,4	8,5	9,7	7,6	7,1	16,8	12,6	10,6	13,2	11,6
Stamford (Newage)	13,0	14,0	12,0	16,0	14,0	12,0	12,0	11,0	11,0	18,0

Используя данные табл.1, 2 по выражению (10) получаем коэффициент избыточности (кратности) мощности ДЭС по отношению к мощности АПБ $K_{и.м}$ с учетом влияния верхних гармоник, значения которого представлены в табл.3. для типичных значений сверхпереходного индуктивного сопротивления синхронного генератора ДЭС.

Таблица 3. Коэффициент избыточности мощности ДЭС по отношению к мощности АПБ, $K_{и.м}$.

Вид и элементная база выпрямительного устройства АБП	Величины $K_{и.м}$ при различных значениях x_d'' , %.		
	10	12	14
Тиристорная 6-ти импульсная	2,11	2,55	3,07
Тиристорная 12-ти импульсная	1,45	1,64	1,87
Тиристорная 12-ти импульсная с фильтром корректором	1,23	1,33	1,40
Тиристорная 12-ти импульсная с бустером	1,07	1,1	1,13
IGBT выпрямитель	1,09	1,13	1,18

Таким образом, из табл. 3 следует, что значения коэффициента избыточности мощности ДЭС в системе «ДЭС-АБП» для трех из пяти рассмотренных типов выпрямителей достаточно значительны и составляют величину от 1,23 до 3,07. В то же время, для тиристорных 12-ти импульсных выпрямителей с бустером и IGBT выпрямителей значения $K_{и.м}$ существенно меньше и составляют от 1,07 до 1,18. Кроме того, из табл. 3 следует, что с увеличением сверхпереходного индуктивного сопротивления генераторов по продольной оси, величины $K_{и.м}$ во всех случаях заметно возрастают, что особенно заметно для трех первых схем.

Расчет мощности ДЭС, работающей в системе «ДЭС-АБП»

Определение мощности ДЭС, питающей АБП при традиционном подходе, считающем все электрические нагрузки линейными [8-10] выполняется по выражению:

$$P_{ДЭС \cdot АБП} = \frac{100}{q} \left(\frac{P_{АБП}}{\eta} + P_{зарАБ} \right), \quad (11)$$

где q – допустимый мгновенный наброс нагрузки, %. Определяется по данным завода-изготовителя (см. рис.2) или в соответствии с ГОСТ 10511;

$P_{АБП}$ – выходная мощность АБП, кВт;

η – коэффициент полезного действия АБП;

$P_{зарАБ}$ – мощность, которая потребляется для заряда аккумуляторной батареи (АБ) АБП, кВт. Определяется по данным завода-изготовителя АБП, или как $(0,15 \dots 0,25) P_{АБП} / \eta$.

С учетом формул влияния высших гармоник, описанных ранее, и формулы (11) общее выражение для определения мощности ДЭС можно представить в виде

$$P_{ДЭС \cdot АБП} = \max \left\{ \frac{100}{q} \left(\frac{P_{АБП}}{\eta} + P_{зарАБ} \right), K \left(\frac{P_{АБП}}{\eta} + P_{зарАБ} \right) \right\}. \quad (12)$$

Целесообразность выбора мощности ДЭС, работающих совместно с АБП различных типов, с учетом влияния высших гармоник показывает приведенный ниже пример.

Пример

Требуется определить мощность ДЭС для различных типов АБП с выходной мощностью 100 кВ·А, характеристики которых представлены в табл. 4.

Таблица 4. Характеристики сравниваемых видов АБП

Тип АБП (производитель)	Вид и элементная база выпрямительного устройства АБП	Номинальная выходная мощность		КПД, %	Мощность, затрачиваемая на заряд АБ, кВт
		Полная, кВ·А	Активная, кВт		
SitePro (GE)	Тиристорная 6-ти импульсная	100	80	93	25
Conceptpower Maxi (Newave)	Тиристорная 12-ти импульсная с бустером	100	80	93	19
PWP 9340 (Powervare)	IGBT выпрямитель	100	80	91	37

Результаты расчета мощности по формуле (12) для различных типов генераторов ДЭС сведены в табл. 5.

Таблица 5. Расчетное значение необходимой мощности ДЭС, кВ·А питающей АБП мощностью 100 кВ·А.

Тип АБП		Расчетная мощность генератора различных фирм, кВ·А	
		Leroy Somer	Stamford (Newage)
SitePro (GE)	без учета гармоник	173	139
	с учетом гармоник	226	274
Conceptpower Maxi (Newave)	без учета гармоник	164	146
	с учетом гармоник	115	122
PWP 9340 (Powervare)	без учета гармоник	195	156
	с учетом гармоник	118	124

Как видно из анализа представленных в табл. 5 результатов расчета, для АБП типа SitePro (GE) с тиристорной 6-ти импульсной схемой выпрямления значение необходимой мощности без учета влияния высших гармоник составляет величину 173 кВт, а с их учетом 226 кВ·А. Т.о., учет влияния высших гармоник вызывает увеличение расчетного значения мощности в 1,3 раза. В то же время из данных табл. 5 следует, что для АБП типов Conceptpower Maxi (Newave) и PWP 9340 (Powervare) влиянием высших гармоник можно пренебречь. Наилучшее значение мощности ДЭС составляет величину 146 кВ·А (реально можно принять мощность ДЭС 140 кВ·А) для АБП Conceptpower (Newave).

Следует также заметить, что для АБП, которые имеют возможность выполнять ограничение тока (отключение) заряда аккумуляторной батареи при переходе на ДЭС, значение мощности необходимой ДЭС будет еще более низким. Так, например, для АБП Conceptpower (Newave) в этом режиме необходимая мощность ДЭС составит всего величину 120 кВ·А.

ВЫВОДЫ

1. Учет влияния верхних гармоник на тепловые режимы работы синхронного генератора позволяет существенно уточнить методику выбора мощности ДЭС, работающей в системе «ДЭС-АБП».
2. Для обеспечения нормального теплового режима работы синхронного генератора в системе «ДЭС-АБП» необходимо увеличивать мощность ДЭС по сравнению с режимом работы ее на линейную нагрузку, значение коэффициент избыточности мощности ДЭС по отношению к мощности АБП K , вызванное

влиянием высших гармоник, можно рассчитывать по формуле (10) или использовать данные табл. 3 для выбранного типа ДЭС с учетом паспортного значения x_d'' ее генератора.

3. При 6-ти импульсной схеме выпрямления АБП величина K составляет $2,1 \dots 3,07$, 12-ти импульсная схема выпрямления позволяет уменьшить K до значения $1,4 \dots 1,9$, а применение выпрямителей с бустером или IGBT транзисторами практически не влияет на тепловые режимы работы ДЭС, в связи с чем последние являются наиболее предпочтительными.

Литература

1. *Говоров Ф.П., Перепеченый В.А.* Учет фактора надежности при проектировании распределительных электрических сетей городов // Энергетика и электрификация. - 2002. - № 6. - С. 12-16.
2. *Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л.* Проблемы качества электроэнергии // Промэлектро.- 2002.- № 4.- С. 13-26.
3. *Галанов В.П., Галанов В.В.* О влиянии нелинейных и несимметричных нагрузок на качество электрической энергии // Промышленная энергетика. - 2001. - № 3. - С. 46-49.
4. *Шидловський А.К., Федоров С.Д., Островський Е.П.* Стандартизація у сфері систем гарантованого електропостачання та агрегатів безперервного живлення // Энергетика и электрификация. - 2002. - № 11. - С. 52-55.
5. *Федоров С.Д., Облакевич С.В.* Технические требования к проектированию систем гарантованого електропостачання електроприемников критической группы // ЭнергоГарант. - 2003. - № 1. - С. 35-58.
6. *Федоров С.Д., Облакевич С.В., Островський Е.П.* Концепція побудови та нормативно-технічного забезпечення систем гарантованого електропостачання як фактора енергетичної безпеки.- Сб. Лідери паливно-енергетичного комплексу 2002-2003 / Велика Рада Всеукраїнського конкурсу. - К.: Українські енциклопедичні знання, 2003. - С. 56-58.
7. *Денисюк С.П.* Аналіз процесів енергообміну в системах з пристроями силової електроніки. // Технічна електродинаміка. – 2000. – С. 15-18.
8. *Комплексные системы* гарантованного електропостачання (КСГЭП). Учебное пособие / Компания "Энергетический Центр "Президент-Нева". - <http://www.powercity.ru/teaching.html>.
9. *Лопухин А.А.* Источники бесперебойного питания без секретов // "А и Т Системы". – М, 2002. - ? <http://www.at-systems.ru/library/book/contents.html>
10. *Цыркин М.И., Гольдинер А.Я., Тюляков К.А.* Режимы работы и определение оптимальной мощности ДЭС в системе «ДЭС-ИБП» // Электросистемы. – 2001. - № 1(3). – С. -
11. *Арриллага Дж, Брэдли Д., Роджерс П.* Гармоники в электрических системах: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - с.
12. *Harmonic Disturbances in Networks and Their Treatment* // Cahier Technique Schneider Electric, No 152. - 25 p.
13. *Fiorina J.N.* Inverters and Harmonics // Cahier Technique Merlin Gerin, No 159. - 19 p.
14. *Климов В.П., Москалев А.Д.* Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания / ЗАО "Тэнси+". - <http://www.tensy.ru>.
15. *Кац А.* Взаимодействие ИБП и дизель-генератора // Сети и системы связи. – 2001. - № 13. – С. ...- ...
16. *Профит М.* Еще раз о совместимости ИБП с дизель-генератором // Сети и системы связи. –2001. -№ 13. С. ...-
17. *Кузьмина О.* Некоторые вопросы совместной работы ДГУ и мощного ИБП // Сети и бизнес. -2002. - № 2(3). - С. ...-
18. *ГОСТ 23377-84.* Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические требования.
19. *Проектирование электрических машин:* Учеб. пособие для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. - с.
20. *Костенко М.П., Пиотровский Л.М.* Электрические машины. Учебник для вузов/ Энергия. Ленинградское отд.? 1973. - с.
21. *Вольдек А.И.* Электрические машины / Л.: Энергия, 1978.
22. *ГОСТ 10511-83.* Системы автоматического регулирования частоты вращения судовых, тепловозных и промышленных дизелей. Общие технические требования.

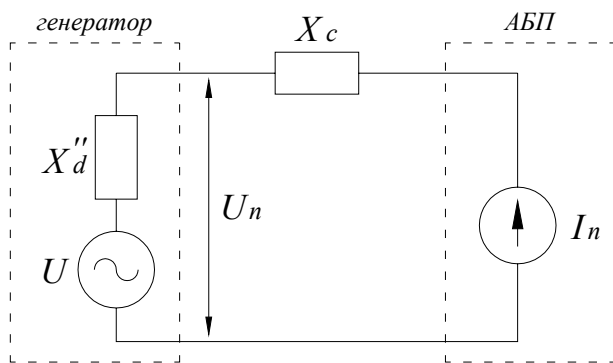


Рис. 1. Схема замещения синхронного генератора для n -ой гармоники

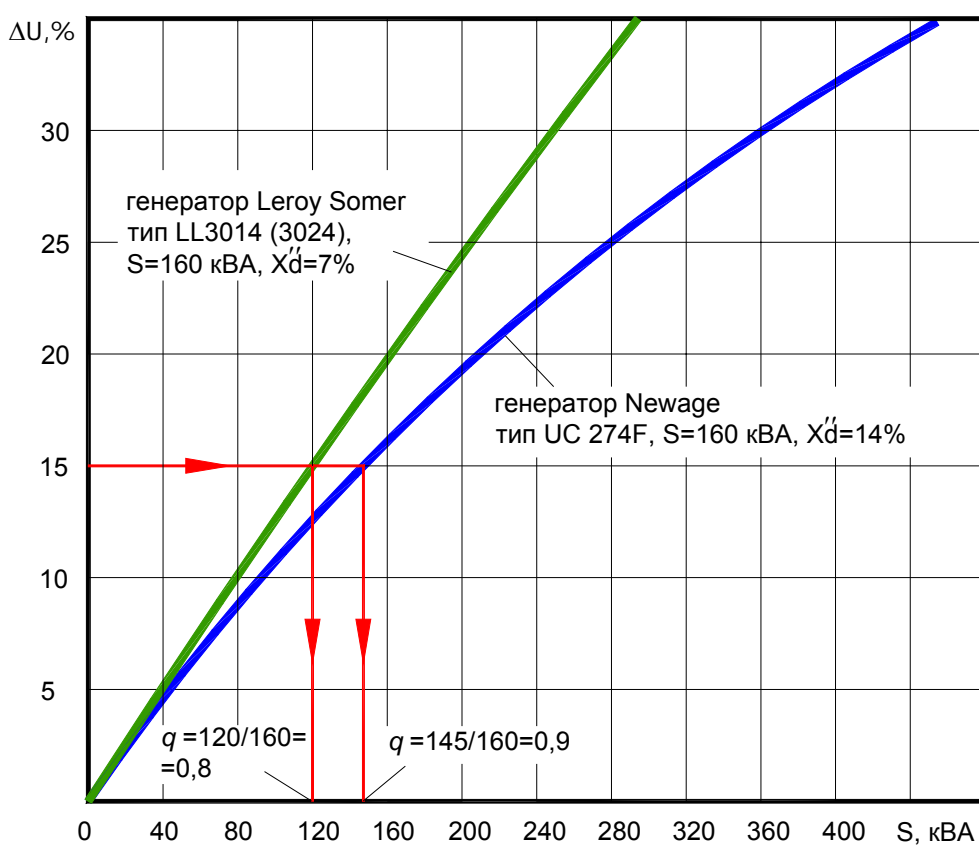


Рисунок 2. Зависимость падения напряжения на генераторе ΔU , % от величины набрасываемой мощности S , кВ·А.