

## ЧАСТЬ IV

# РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

## Глава 11

### Режимы работы синхронного генератора

#### § 11.1. Характеристика режимов синхронного генератора при пуске от него асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

При резком изменении активной и реактивной нагрузки синхронного генератора, характерном для случая включения на него асинхронного короткозамкнутого электродвигателя соизмеримой мощности, значительно изменяются напряжение и частота генератора.

Для уменьшения величины пусковых токов, а следовательно, и для снижения колебаний напряжения применяются специальные способы пуска асинхронных короткозамкнутых электродвигателей: с реактивным и активным сопротивлением в цепи статора, с переключением обмоток статора электродвигателя со звезды на треугольник и при помощи автотрансформатора. Все эти способы уменьшают потребляемый электродвигателем ток при пуске, но требуют применения специальной коммутационной аппаратуры. На рис. 11.1 и 11.2 представлены осциллограммы переходных процессов при указанных способах пуска электродвигателей насосов от дизель-генератора мощностью 100 кВт и от турбогенератора мощностью 600 кВт.

На осциллограммах обозначены:  $U$ ,  $I$  – напряжение и ток статора генератора;  $U_{\text{в}}$ ,  $i_{\text{в}}$  – напряжение и ток ротора генератора;  $i_{\text{в,в}}$  – ток возбуждения возбудителя;  $n_{\text{г}}$ ,  $n_{\text{д}}$  – скорость вращения ротора генератора и пускаемого электродвигателя.

Очевидно, что пуск прямым включением является наиболее простым и надежным, а в ряде случаев, например для электропривода грузозовых устройств, и единственно возможным по технико-экономическим соображениям. Но этот способ пуска мощных электродвигателей вызывает подчас недопустимые колебания напряжения: из рис. 11.1, а видно, что снижение напряжения при включении электродвигателя достигает 45 % от номинального значения.

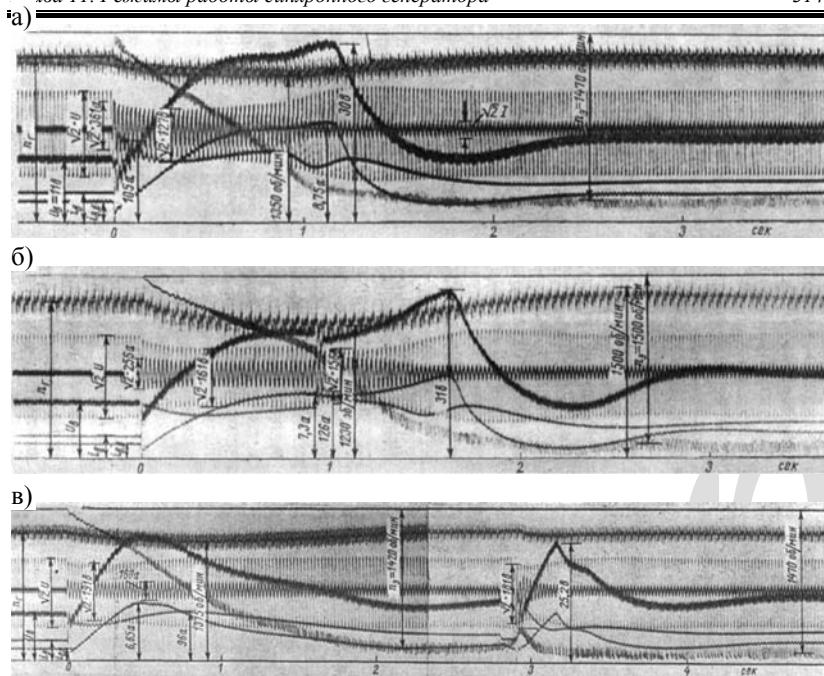


Рис. 11.1. Осциллограммы переходного процесса при пуске электродвигателя мощностью 50 кВт с шестикратным пусковым током от дизель-генератора мощностью 100 кВт с машинным возбуждением: а – пуск прямым включением; б – пуск с активным сопротивлением в цепи статорной обмотки; в – пуск переключением обмоток статора со звезды на треугольник

Пуск электродвигателя с активным сопротивлением в цепи статора позволяет уменьшить провал напряжения, но, как видно из рис. 11.1, б, приводит к значительному снижению частоты. Это объясняется увеличением значения активной мощности, включаемой на дизель, в результате увеличения пускового коэффициента мощности. Длительность переходного процесса возрастает, так как из-за падения напряжения в пусковых сопротивлениях напряжение на зажимах электродвигателя оказывается существенно ниже напряжения генератора, что вызывает длительный разбег электродвигателя.

При пуске способом переключения обмоток электродвигателя со звезды на треугольник значительно уменьшается как провал напряжения (см. рис. 11.1, в), так и величина изменения скорости вращения дизеля, длительность переходного процесса незначительна, однако вращающий момент электродвигателя существенно уменьшается.

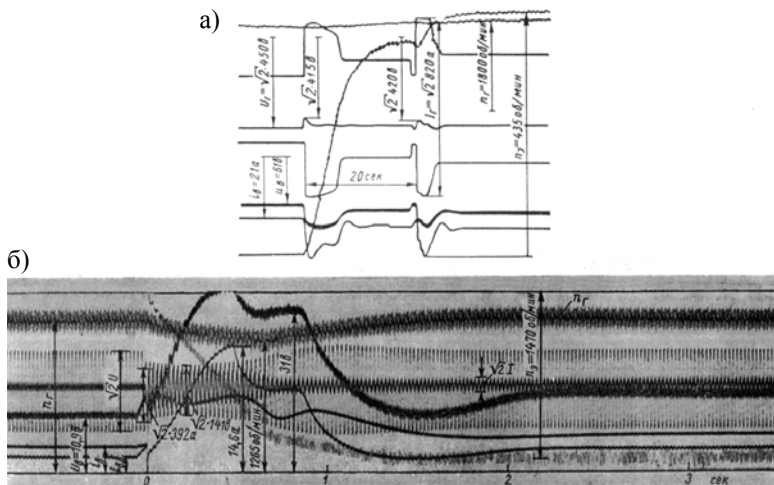


Рис. 11.2. Осциллограммы переходного процесса:

а – при пуске электродвигателя мощностью 136/110 кВт от турбогенератора мощностью 600 кВт через автотрансформатор; б – при пуске электродвигателя мощностью 50 кВт от дизель-генератора мощностью 100 кВт с опережением перевозбуждения последнего

Подобный характер переходного процесса наблюдается и при пуске электродвигателя через автотрансформатор, что видно из рис. 11.2, а. При коэффициенте соизмеримости электродвигателя с генератором, равном 0,23, величина провалов напряжения на первой и второй ступенях пуска не превышает 8 % от номинального значения.

Осциллограмма на рис. 11.2, б иллюстрирует переходный процесс генератора при пуске электродвигателя способом, предложенным для электроустановок с нерегулируемыми генераторами [41]. По этому способу генератор перевозбуждается в момент включения электродвигателя, что обеспечивает быстрый разгон последнего.

Сравнительные данные осциллограмм сведены в табл. 11.1.

Таким образом, одновременное уменьшение величины и длительности провала напряжения и изменения частоты при пуске электродвигателя может быть достигнуто в результате применения способа переключения обмоток со звезды на треугольник или использования автотрансформатора. Однако возможность применения первого способа пуска должна определяться с учетом величины начального момента сопротивления приводного механизма и величины уставки токовой защиты, так как переключение обмоток со звезды на треугольник сопровождается значительным броском тока.

Таблица 11.1

Сравнительные данные, характеризующие пуск различными способами электродвигателя мощностью 50 кВт от дизель-генератора мощностью 100 кВт				
Показатели переходного процесса	Способ пуска			
	Прямой	С сопротивлением в цепи статора	Переключением обмоток со звезды на треугольник	С опережением перевозбуждения генератора
Изменение напряжения в момент $t = 0$ , %	28	12	10	23,5
Максимальное изменение напряжения, %	45	28,5 (34,5)	19,5 (22,8)	35,7
Время наступления максимального изменения напряжения, с	0,27	0,28 (0,12)	0,175 (0,1)	0,18
Длительность изменения напряжения до номинального значения, с	1,1	1,55	0,8 (0,4)	0,77
Максимальное уменьшение частоты, %	10	14	8	13,2
Время наступления максимального уменьшения частоты, с	0,975	0,9	0,7	0,63
Длительность изменения частоты до номинального значения, с	2,1	1,85	2,5	1,5
Длительность разбега электродвигателя, с	1	1,7	2 (0,13)	0,7

Примечание. В скобках указаны значения соответствующих величин с момента шунтирования пускового сопротивления или включения обмоток электродвигателя в треугольник.

Из сравнения кривых разбега электродвигателя можно установить, что несмотря на трехкратное уменьшение (по сравнению с номинальным значением) вращающего момента при соединении обмоток электродвигателя в звезду, скорость разбега его в данном случае выше, чем при пуске с сопротивлением в цепи статора. Это свидетельствует о том, что возможность применения способа пуска электродвигателя

с сопротивлением в цепи статора (так же, как и способа пуска при помощи автотрансформатора) должна определяться с учетом величины начального момента сопротивления приводного механизма, ибо падение напряжения на дополнительном сопротивлении существенно снижает величину напряжения на зажимах электродвигателя и, следовательно, величину пускового момента, определяющую возможность и быстроту разбега электродвигателя.

### § 11.2. Параметры асинхронного электродвигателя, определяющие переходный процесс синхронного генератора

Пусковой ток асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, как известно, равен 5–7-кратному значению номинального тока, а коэффициент мощности при пуске уменьшается до 0,4–0,45. Величина активной и реактивной мощности, которую потребляет электродвигатель от сети в период пуска, определяется его параметрами. Зависимость полного сопротивления асинхронного электродвигателя от скольжения  $s$ , как установил И.А. Сыромятников [31], имеет вид

$$\frac{z(s)}{z_k} = \sqrt{\frac{1 + (s_{кр}/s)^2}{1 + s_{кр}^2}}, \quad (11.1)$$

где

$$z_k = x_k \sqrt{1 + s_{кр}^2} \quad (11.2)$$

является полным сопротивлением электродвигателя при заторможенном роторе (сопротивление короткого замыкания);

$$s_{кр} = \frac{c_0 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}} \approx \frac{c_0 r_2'}{x_k} - \text{критическое скольжение; } x_k = x_1 + c_0 x_2' -$$

реактивное сопротивление при заторможенном роторе;  $x_1, r_1, x_2', r_2'$  – реактивные и активные сопротивления, соответственно статора и ротора;

$c_0 = 1 + \frac{z_1}{z_0} \approx 1$  – коэффициент, характеризующий влияние комплексного сопротивления обмотки статора на комплексное сопротивление ветви намагничивания.

Из формулы (11.1) видно, что полное сопротивление электродвигателя при изменении скольжения последнего от единицы до критического значения почти не изменяется, а затем по мере уменьшения скольжения резко возрастает.

В автономных энергетических системах во время переходных режимов и в некоторых статических режимах меняется не только напряжение, но и частота сети. Поэтому необходимо знать, в какой степени изменяется эквивалентное сопротивление асинхронного электродвигателя при изменении скорости его вращения  $n$  и частоты сети  $f$ .

При изменении частоты сети будут изменяться как реактивные, так и активные сопротивления обмоток электродвигателя, однако изменением активных сопротивлений можно пренебречь. В этом случае в формуле (11.1) скольжение электродвигателя и его сопротивление короткого замыкания в функции частоты определяются выражениями

$$s_f = \frac{n_0 f - n}{n_0 f} = \frac{f - n}{f}; \quad s_{кpf} = \frac{s_{кр}}{f}; \quad (11.3)$$
$$z_{kf} = x_k \sqrt{f^2 + s_{кр}^2},$$

где  $n_0$  – синхронная скорость вращения при номинальной частоте.

Подставляя в последнее равенство  $x_k$  из (11.2), получаем

$$z_{kf} = z_k \sqrt{\frac{f^2 + s_{кр}^2}{1 + s_{кр}^2}}, \quad (11.4)$$

а затем, подставляя (11.3) и (11.4) в (11.1), имеем

$$\frac{z(n, f)}{z_k} = \frac{f}{f - n} \sqrt{\frac{(f - n)^2 + s_{кр}^2}{1 + s_{кр}^2}}. \quad (11.5)$$

По этим формулам на рис. 11.3 построены кривые, иллюстрирующие изменение полного сопротивления электродвигателя в функции скорости его вращения и частоты сети. Как видно из рисунка, в диапазоне изменения скорости вращения от нуля до критической полное сопротивление электродвигателя с уменьшением частоты уменьшается и резко возрастает с момента достижения электродвигателем критической скорости вращения, соответствующей данной частоте сети. До этого момента сопротивление короткого замыкания электродвигателя, как следует из выражения (11.4), изменяется почти прямо пропорционально частоте, причем в пределах возможного уменьшения частоты до 80 % при переходном процессе указанная зависимость сохраняется для электродвигателей с величиной критического скольжения, равной 0,1–0,4.

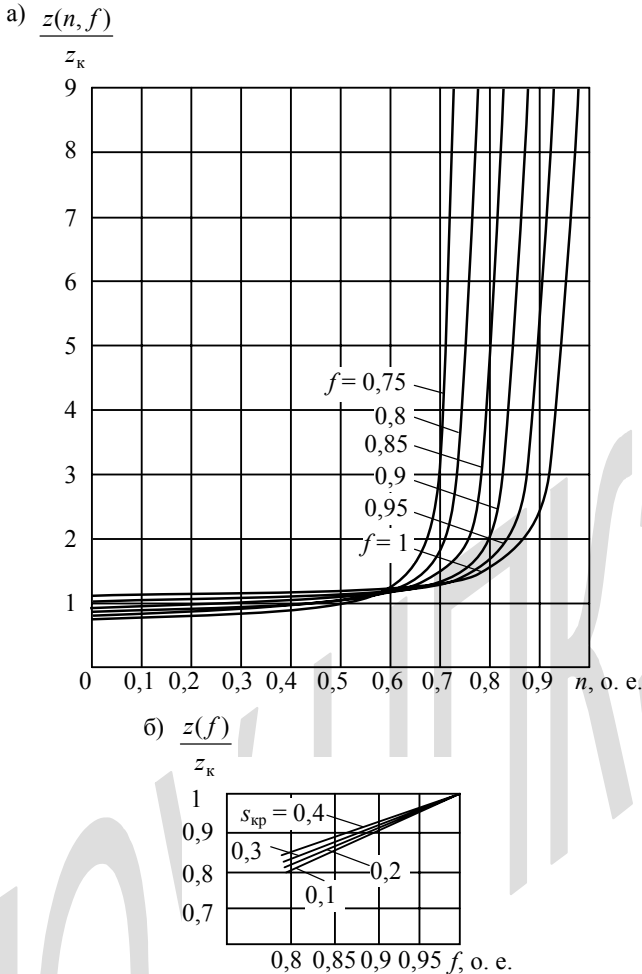


Рис. 11.3. Зависимости: а – полного сопротивления асинхронного электродвигателя (с критическим скольжением 0,2) от его скорости при различной частоте питающей сети; б – сопротивления короткого замыкания от частоты сети при различном критическом скольжении

При пуске электродвигателя изменение скорости вращения генератора будет определяться величиной активной мощности, потребляемой электродвигателем. Величина и характер изменения последней зависят от соотношения между активной и реактивной составляющими полного сопротивления. Изменение этих составляющих при изменении

скорости вращения электродвигателя и частоты сети можно определить, воспользовавшись формулой И.А. Сыромятникова [31]

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{x_k}{r_1 + \frac{c_0 r_2'}{s}},$$

где  $\varphi_1$  – угол между напряжением сети и приведенным током ротора.

В пусковой период током холостого хода электродвигателя можно пренебречь и тогда угол  $\varphi_1$  будет почти равен углу  $\varphi$  между векторами напряжения сети и тока статора. Использование последней формулы затрудняется вследствие отсутствия в паспортных данных электродвигателей значений активных сопротивлений их обмоток. Если принять, что между активными сопротивлениями обмоток асинхронного электродвигателя существует соотношение  $r_1 = c_0 r_2'$ , то формула примет вид

$$\operatorname{tg}\varphi \approx \frac{x_k s}{c_0 r_2' (1+s)} \approx \frac{s}{s_{\text{кр}} (s+1)}. \quad (11.6)$$

Тогда величина коэффициента мощности при пуске электродвигателя определяется выражением

$$\cos \varphi_{\text{п}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}. \quad (11.7)$$

Эта формула при отсутствии в паспортных данных электродвигателя пускового коэффициента мощности позволяет определить его по величине критического скольжения.

График зависимости (11.7) построен на рис. 11.4.

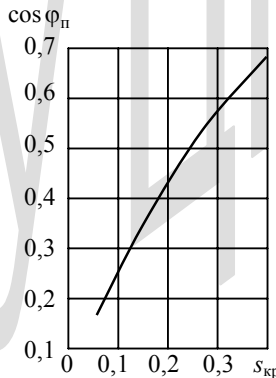


Рис. 11.4. Зависимость пускового значения коэффициента мощности короткозамкнутого асинхронного электродвигателя от критического скольжения



Изменение пускового коэффициента мощности при изменении скорости вращения электродвигателя и частоты сети определяется выражением (11.6) с учетом равенств (11.3)

$$\operatorname{tg} \varphi_f = \frac{f(f-n)}{s_{\text{кр}}(2f-n)}$$

и тогда

$$\cos \varphi_f = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_f}}. \quad (11.8)$$

Зависимость коэффициента мощности от скорости вращения построена на рис. 11.5 при различном значении частоты, диапазон изменения которой при пуске электродвигателя принят с запасом, в пределах от 1 до 0,7 номинального значения. Как следует из этого рисунка, уменьшение частоты приводит к увеличению пускового коэффициента мощности электродвигателя.

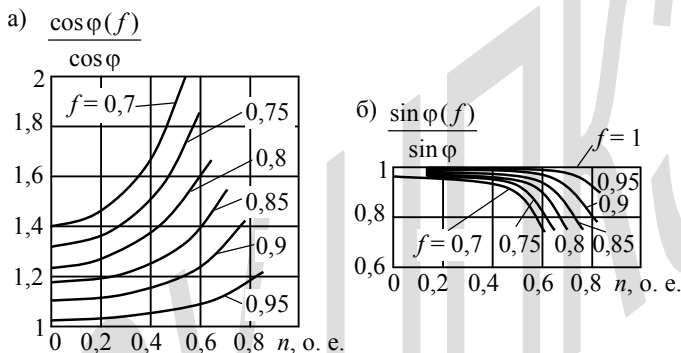


Рис. 11.5. Изменение относительных значений составляющей полного сопротивления электродвигателя в зависимости от его скорости вращения при различной частоте сети: а – активной составляющей; б – реактивной составляющей

Следовательно, по мере разгона электродвигателя, включение которого на генератор вызывает уменьшение частоты, увеличение активной составляющей полного сопротивления электродвигателя происходит более резко по сравнению с изменением этой составляющей при постоянной частоте.

Необходимо отметить, что здесь и в дальнейшем изменение составляющих полного сопротивления электродвигателя в функции скорости вращения последнего и частоты сети рассматривается только до момента достижения электродвигателем критической скорости вращения,

величина которой при данной частоте сети определяется из соотношения  $n_{крf} = f - s_{кр}$ .

Изменение синуса угла, определяющее изменение реактивной составляющей полного сопротивления в функции частоты, представлено на рис. 11.5, б. Как следует из сопоставления графиков, реактивная составляющая по сравнению с активной составляющей в пределах изменения скорости вращения электродвигателя от нуля до критического значения изменяется незначительно. Таким образом, до момента достижения электродвигателем критической скорости вращения изменение составляющих его полного сопротивления в функции частоты представится выражениями

$$r_{kf} = z_{kf} \cos \varphi_f; \quad x_{kf} = z_{kf} \sin \varphi_f. \quad (11.9)$$

### § 11.3. Переходный процесс синхронного генератора при пуске асинхронного электродвигателя

Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором при пуске потребляет ток, превосходящий номинальный в пять–семь раз, причем эквивалентное сопротивление электродвигателя (сопротивление короткого замыкания) с увеличением скорости вращения от нуля до критической сохраняется постоянным. Эта особенность позволяет рассматривать включение электродвигателя на генератор в период разгона его до скорости, равной примерно 80 % от номинальной, как включение на зажимы генератора нагрузки, эквивалентной приведенному сопротивлению короткого замыкания электродвигателя,

$$z_d = \frac{\eta_d \cos \varphi_d P_r}{k_i \cos \varphi_r P_d} \left( \frac{U_d}{U_r} \right)^2, \quad (11.10)$$

где  $\eta_d$  – к.п.д. электродвигателя;  $k_i$  – кратность пускового тока;  $\cos \varphi_r$ ,  $\cos \varphi_d$  – номинальное значение коэффициента мощности генератора и коэффициента мощности электродвигателя, соответственно;  $U_r$ ,  $U_d$  – напряжение на зажимах генератора и электродвигателя, соответственно;  $P_r$ ,  $P_d$  – номинальные активные мощности соответственно на зажимах генератора и на валу электродвигателя.

Переходный процесс генератора при включении электродвигателя осложняется тем, что эквивалентное сопротивление электродвигателя содержит значительную величину реактивного сопротивления, и поэтому реакция якоря генератора преимущественно проявляется по его продольной оси, действуя навстречу основному магнитному потоку.

Коэффициент активной мощности электродвигателя при неподвижном роторе, как установлено выше, равен 0,4–0,45, а коэффициент реактивной мощности равен 0,92–0,9. Величина последнего так же, как и сопротивление электродвигателя, сохраняется практически постоянным при изменении скольжения от единицы до критического значения  $s_{кр}$ .

Определение величины и длительности изменения напряжения является одной из главных задач при проектировании автономной электростанции, в которой предполагается пуск асинхронных короткозамкнутых электродвигателей большой мощности.

Опубликованные методы расчета провала напряжения без учета изменения скорости вращения ограничиваются случаем пуска электродвигателя мощностью не выше 20–25 % мощности генератора с пусковым значением коэффициента мощности не выше 0,45. Расчет пуска электродвигателя большей мощности или с более высоким пусковым значением коэффициента мощности приводит к значительной погрешности, так как в этом случае принятое в указанных методах условие постоянства скорости вращения генератора перестает соответствовать действительности.

Величина пусковой мощности электродвигателя, определяющая собой относительное отклонение нагрузки на валу двигателя генератора, зависит от сопротивления короткого замыкания электродвигателя  $z_d$ , от пускового значения коэффициента мощности  $\cos \varphi_n$  и от напряжения на зажимах электродвигателя. В случае пуска электродвигателя от генератора с компаундированием значение пусковой мощности следует определять для номинального значения напряжения на его зажимах

$$P_d = 3 \frac{U_{ном}^2}{z_d} \cos \varphi_n 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (11.11)$$

так как система компаундирования обеспечивает быстрый подъем возбуждения генератора и вызывает активное протекание переходного процесса с быстрым восстановлением напряжения.

В случае пуска электродвигателя от генератора с машинным возбуждением величину пусковой мощности можно рассчитать с учетом первоначального провала напряжения по формуле

$$P_d = 3 \frac{U_0^2}{z_d} \cos \varphi_n 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (11.12)$$

где  $U_0 = U_{ном} - \Delta U_0$ ;  $\Delta U_0$  – первоначальный провал напряжения.

Вычисляя отношение изменения нагрузки на валу энергетического двигателя к величине его максимального момента  $\lambda$  (это означает, что муфта измерителя регулятора скорости достигает упора, соответствующего

максимальной нагрузке – см. § 3.4), можно получить в соответствии с (11.11) и (11.12) следующие выражения:

для генератора с компаундированием

$$\lambda = 1,36 \frac{U_{\text{ном}}^2 \cos \varphi_{\text{аН}}}{z_{\text{н}} \eta_{\text{Г}} \cos \varphi_{\text{Г}}} \left( \frac{P_{\text{Г}}}{N_{\text{max}}} \right); \quad (11.13)$$

для генератора с машинным возбуждением

$$\lambda = 1,36 \frac{U_0^2 \cos \varphi_{\text{аН}}}{z_{\text{н}} \eta_{\text{Г}} \cos \varphi_{\text{Г}}} \left( \frac{P_{\text{Г}}}{N_{\text{max}}} \right), \quad (11.14)$$

где  $P_{\text{Г}}$ ,  $N_{\text{max}}$  – соответственно номинальная мощность генератора, кВт, и максимальная мощность его двигателя, л.с. (остальные величины в относительных единицах);  $z_{\text{н}}$  – полное сопротивление набрасываемой нагрузки;  $\cos \varphi_{\text{аН}}$  – коэффициент мощности набрасываемой нагрузки с учетом активного сопротивления обмотки статора генератора.

Как указывалось выше, следует принимать, что величина относительного отклонения нагрузки на валу двигателя генератора сохраняется неизменной в течение разгона электродвигателя. Тогда в течение пускового процесса – с момента включения на генератор электродвигателя до момента достижения последним критического скольжения, изменение относительного отклонения скорости вращения генераторного агрегата во времени может быть описано функцией

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{max}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{\psi}}} \right), \quad (11.15)$$

где  $\varphi_{\text{max}}$  – максимальное отклонение скорости вращения генератора, определяемое из выражения (3.53) как величина амплитуды первого полупериода колебаний;  $T_{\psi}$  – постоянная времени экспоненциального графика, аппроксимирующего реальный график снижения скорости вращения энергетического двигателя при пуске электродвигателя (рис. 11.6).

Максимальное отклонение скорости генератора  $\varphi_{\text{max}}$ , которое имеет место в первой полупериод колебания скорости, может быть определено по экстремальным точкам графика формулы (3.53) для моментов времени (см. рис. 11.6)  $t = 0$  и  $t_m$

$$\varphi_{\text{max}} = \rho \lambda \delta \left[ e^{-\frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{\pi}{2} - \psi + \psi_0 \right)} \sin \psi_0 + \cos \psi \right], \quad (11.16)$$

где  $t_m = \frac{1}{\beta} \left( \frac{\pi}{2} - \psi + \psi_0 \right)$ ,  $\psi_0 = \arctg \frac{\beta}{\alpha}$

Значение постоянной времени  $T_\psi$  определяется из равенства площадей, ограниченных расчетным и аппроксимирующим графиками изменения скорости энергетического двигателя в интервале от 0 до  $t_m$ , т. е.

$$\int_0^{t_m} \varphi_{\max} \sin \frac{\pi}{2t_m} t dt = \int_0^{t_m} \varphi_{\max} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_\psi}} \right) dt,$$

откуда

$$T_\psi = \frac{0,396}{\beta} \left( \frac{\pi}{2} - \psi + \psi_0 \right), \text{ с.} \quad (11.17)$$

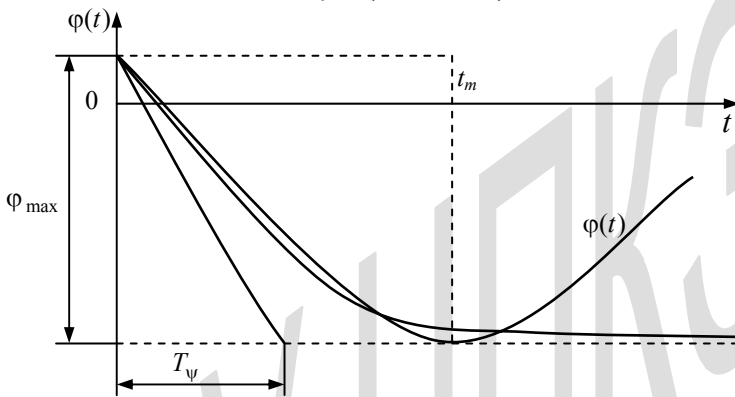


Рис. 11.6. К оценке параметров механического процесса генераторного агрегата при пуске асинхронного короткозамкнутого электродвигателя

Таким образом, изменение скорости вращения (частоты) генератора в рассматриваемом переходном процессе будет определяться выражением

$$\omega(t) = 1 - \varphi_m \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_\psi}} \right) = f(t). \quad (11.18)$$

Погрешность расчета по этой формуле максимального изменения скорости вращения дизель-генератора при пуске от него электродвигателя соизмеримой мощности, осуществляемом различными способами, не превышает 5% и иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 11.7.

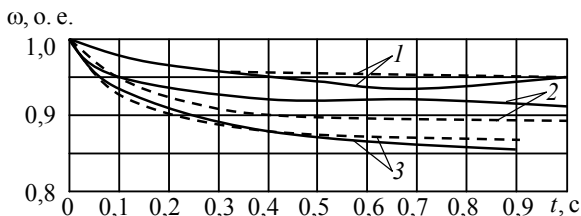


Рис. 11.7. Экспериментальные (сплошные) и расчетные (штриховые) кривые изменения скорости вращения дизеля при различных способах пуска электродвигателя от генератора: 1 – пуск электродвигателя переключением со звезды на треугольник ( $\lambda = 0,525$ ); 2 – пуск прямым включением ( $\lambda = 1,13$ ); 3 – пуск с активным сопротивлением в цепи статора электродвигателя ( $\lambda = 1,35$ )

Когда при пуске электродвигатель достигает критической скорости вращения и происходит дальнейшее увеличение скорости, его эквивалентное сопротивление резко возрастает до величины, соответствующей номинальной скорости вращения. Эта особенность позволяет приближенно исследовать и рассчитывать весь процесс изменения скорости вращения двигателя генератора. Полагая, что в момент достижения электродвигателем критического скольжения изменение его эквивалентного сопротивления означает сброс части нагрузки с генератора, можно при помощи формулы (3.53) рассчитывать последующий переходный процесс с начальными условиями  $t = 0$ ,  $\varphi_0 = \varphi_{\max}$ ,  $\dot{\varphi}(0) = 0$ .

Угол сдвига фазы процесса равен

$$\psi = \arccos \frac{\varphi_{\max}}{\rho \delta (\lambda_{\text{п}} - \lambda_{\text{y}})}, \quad (11.19)$$

где  $\lambda_{\text{п}}$ ,  $\lambda_{\text{y}}$  – величина нагрузки электродвигателя в пусковом и нормальном режимах, определяемая при помощи кривых  $z(s)$ , приведенных на рис. 11.3.

Расчетный график для получения общей картины пускового процесса следует присоединить к расчетному графику изменения скорости вращения электродвигателя от нуля до критического значения.

Переходный процесс для генератора с компаундированием может быть рассчитан при помощи уравнения [41]

$$\dot{U} + k_2 U = k_1 [U_{\text{в max}} l(t) - U_{\text{в max}} \varphi(t)],$$

а для генератора с машинным возбуждением – при помощи уравнения

$$\dot{U} + k_2 U = k_1 [U_{\text{в0}} l(t) + k(t - \tau) l(t - \tau) - k(t - \tau_m) l(t - \tau_m) - k_n \varphi(t)],$$

в которых изменение скорости вращения энергетического двигателя представляется формулой (11.15)

$$\varphi(t) = \varphi_{\max} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{\psi}}} \right).$$

Решение исходных дифференциальных уравнений дает расчетные формулы изменения напряжения генератора при включении динамической нагрузки с учетом влияния изменения скорости вращения энергетического двигателя генератора:

для генератора с компаундированием

$$U(t) = U_{\text{в max}} (1 - \varphi_{\max}) \frac{k_1}{k_2} + [U_0 - U_{\text{в max}} (1 - \varphi_{\max}) \frac{k_1}{k_2} + U_{\text{в max}} \frac{k_1 \varphi_{\max}}{k_{\psi} - k_2}] e^{-k_2 t} - U_{\text{в max}} \frac{k_1 \varphi_{\max}}{k_{\psi} - k_2} e^{-k_{\psi} t}; \quad (11.20)$$

для генератора с машинным возбуждением

$$U(t) = (U_{\text{в0}} - k_m - k\tau) \frac{k_1}{k_2} + k \frac{k_1}{k_2} t + \left[ U_0 - \left( U_{\text{в0}} - k_m - \frac{k}{k_2} e^{k_2 \tau} \right) \frac{k_1}{k_2} + \frac{k_1 k_m}{k_{\psi} - k_2} \right] e^{-k_2 t} - \frac{k_1 k_m}{k_{\psi} - k_2} e^{-k_{\psi} t} - k \frac{k_1}{k_2} \left[ \frac{1}{k_2} e^{-k_2(t-\tau_m)} 1(t-\tau_m) + (t-\tau_m) 1(t-\tau_m) \right] \text{ для } t > \tau, \quad (11.20, \text{a})$$

где коэффициенты

$$k_1 = \frac{\xi'}{T_{d0}}; \quad k_2 = \frac{\xi'}{\xi T_{d0}} = \frac{k_1}{\xi}; \quad k_m = k_n \varphi_{\max}; \quad k_{\psi} = T_{\psi}^{-1}; \quad (11.21)$$

$\xi; \xi'$  – по (1.4), (1.22).

Обращаясь к исходным данным, можно отметить, что полученные формулы позволяют рассчитать изменение напряжения с учетом изменения скорости вращения синхронного явно- и неявнополюсного, паро- и газотурбинного генератора, дизель-генератора с компаундированием или с машинным автоматическим возбуждением при набросе на него нагрузки любого вида и при пуске асинхронного, короткозамкнутого электродвигателя мощностью более 25 % мощности генератора со значением пускового коэффициента мощности выше 0,45.

### § 11.4. Оценка предельных отклонений напряжения и частоты синхронного генератора при пуске асинхронного электродвигателя

Величина максимального снижения напряжения генератора в период переходного процесса может быть непосредственно определена из формул (11.20), если известно, через какое время после начала переходного процесса снижение напряжения будет максимальным. Это время можно найти по общему правилу определения экстремальных точек заданной функции, т. е. из равенства  $\dot{U}(t) = 0$ .

Для генератора с компаундированием в результате решения алгебраического уравнения  $\dot{U}(t) = 0$  получим

$$t_{\min} = \frac{1}{k_{\psi} - k_2} \ln \frac{bk_{\psi}}{ak_2}. \quad (11.22)$$

Здесь и ниже  $a$  – коэффициент в расчетной формуле изменения напряжения перед  $e^{-k_2 t}$ ;  $b$  – коэффициент перед  $e^{-k_{\psi} t}$ .

Как следует из (11.20), у генератора с компаундированием при снижении скорости вращения может оказаться, что первоначальный провал напряжения не будет представлять собой максимальный провал, как это имеет место при постоянной скорости вращения (в случае включения на генератор реактивной нагрузки). Из формулы (11.22) можно установить, что при условии

$$\Delta U_0 \leq \varphi_{\max} \frac{k_{\psi}}{k_{\psi} - k_2} \quad (11.23)$$

максимальный провал напряжения генератора будет больше первоначального.

Для генератора с машинным возбуждением можно получить два выражения: первое для случая, когда максимальное уменьшение напряжения генератора наступает раньше, чем напряжение его возбуждения достигнет «потолочного» значения, т. е. при  $t_{\min} < \tau_m$ , и второе, когда максимальное уменьшение напряжения имеет место после достижения напряжением возбуждения «потолочного» значения, т. е. при  $t_{\min} > \tau_m$ .

В первом случае выражение, из которого можно определить время наступления максимального провала напряжения, имеет вид

$$K_1 e^{-k_2 t_{\min}} = 1 + K_2 e^{-k_{\psi} t_{\min}}, \quad (11.24)$$



где 
$$K_1 = \frac{ak_2^2}{kk_1}; K_2 = \frac{bk_{\psi}k_2}{kk_1}.$$

Найти  $t_{\min}$  из этого трансцендентного уравнения можно графическим путем, построив две экспоненциальные кривые. Абсцисса точки их пересечения будет соответствовать искомой величине времени.

Для второго случая время наступления максимального провала напряжения выражается в явном виде

$$t_{\min} = \frac{1}{k_{\psi} - k_2} \ln \frac{K_2}{K_1 - e^{k_2 \tau_m}}. \quad (11.25)$$

Отсюда следует, что при условии  $K_1 < e^{k_2 \tau_m}$  искомое время следует находить из уравнения (11.24).

Полученные расчетные формулы (11.20) позволяют определить напряжение генератора при заданных значениях возбуждения и скорости вращения. Так, полагая в них  $t = \infty$ , можно получить для генератора:

с компаундированием

$$U(\infty) = U_{\text{в max}} (1 - \varphi_{\text{max}}) \frac{k_1}{k_2}, \quad (11.26)$$

для генератора с машинным возбуждением

$$U(\infty) = [U_{\text{в max}} (1 - \varphi_{\text{max}}) - k_{\text{с max}}] \frac{k_1}{k_2}, \quad (11.27)$$

где величины возбуждения, отклонения скорости вращения и нагрузки подставляются в соответствии с задаваемыми значениями.

Если установлено, что изменение скорости вращения генератора в переходном процессе не превышает 5 %, то влиянием этого фактора на изменение напряжения генератора можно пренебречь. Расчетные формулы для данного случая можно получить из формулы (11.20), полагая в ней  $\varphi_{\text{max}} = 0$ .

Экспериментальное исследование рассматриваемого переходного процесса синхронного генераторного агрегата подтверждает возможность использования принятых выше допущений и условий.

Для оценки погрешности предлагаемой методики расчета переходного процесса, учитывающей изменение скорости вращения генератора с компаундированием, на рис. 11.8 показаны экспериментальные и расчетные кривые изменения напряжения и частоты дизель-генератора при пуске электродвигателя.

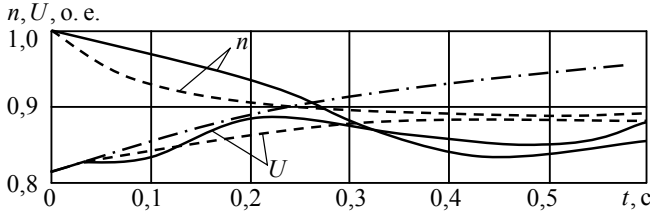


Рис. 11.8. Экспериментальные (сплошные) и расчетные (штриховые) кривые изменения скорости вращения дизель-генератора (100 кВт, 1500 об/мин) с компаундированием напряжения и с одноимпульсным регулятором скорости при пуске электродвигателя (41 кВт, 1470 об/мин) прямым включением. Штрих-пунктирная линия – расчетная кривая  $U(t)$  без учета изменения скорости вращения дизеля

График изменения скорости вращения (частоты) генератора до момента достижения электродвигателем критического скольжения построен по формуле (11.15), график изменения напряжения – по формуле (11.20). Сравнение расчетных и экспериментальных кривых показывает удовлетворительную точность расчета: погрешность в определении изменения частоты составляет не более 5 %, изменения напряжения – не более 3 %.

Во многих практических случаях возникает необходимость быстро оценить величину провала напряжения на шинах генератора при пуске от него короткозамкнутого электродвигателя известной мощности. Такую оценку для генератора с компаундированием можно получить по формуле

$$\Delta U_0 = \frac{k_T x'_d}{k_T x'_d + 1}, \quad (11.28)$$

если известно отношение величины пускового тока электродвигателя к номинальному току генератора  $k_T$ , или по формуле

$$\Delta U_0 = \frac{k_c x'_d}{k_c x'_d + k_p}, \quad (11.29)$$

где  $k_c = \frac{P_d}{P_T}$  – коэффициент соизмеримости электродвигателя и генератора по величинам паспортных мощностей;  $k_p = 0,9 \frac{\eta_d \cos \varphi_d}{k_i \cos \varphi_T}$  – расчетный коэффициент, определяемый по табл. 11.2.

Этот коэффициент вычислен для средних значений номинальных к.п.д. электродвигателей  $\eta_d$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi_d$ , принятых равными соответственно 0,88; 0,85.

Таблица 11.2

Значения коэффициента $k_p$ для расчета провала напряжения генератора с компаундированием								
$\cos \varphi_r$	Кратность пускового тока электродвигателя $k_i$							
	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
0,8	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11
0,7	0,24	0,21	0,19	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13

Оценка провала напряжения генератора с компаундированием при включении на него реактивной или динамической нагрузки с пусковым коэффициентом мощности до 0,45 может быть произведена по графикам, построенным на рис. 11.9 при помощи формул (11.28) и (11.29). Для случаев определения провала напряжения дизель-генератора или турбогенератора, имеющих обычные параметры, на рис. 11.9, б указаны пределы значений коэффициента соизмеримости пускаемого асинхронного электродвигателя  $k_0$ , при которых влиянием изменения скорости вращения агрегатов на провал напряжения можно пренебречь.

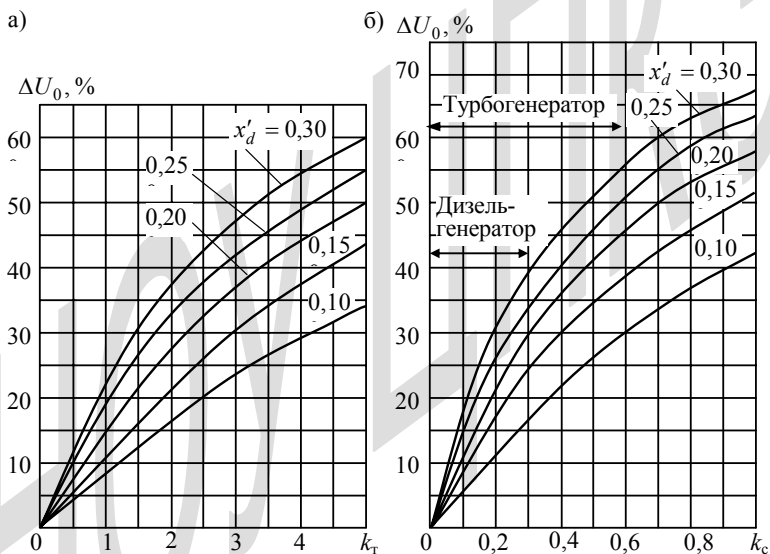


Рис. 11.9. Графики для оценки провала напряжения генератора с компаундированием, имеющего номинальный коэффициент мощности 0,8, при постоянной скорости вращения: а – при включении реактивной нагрузки; б – при включении асинхронного короткозамкнутого электродвигателя. Расчетный коэффициент  $k_p$  принят равным 0,14

**Пример 11.1.** Расчет снижения напряжения генератора с компаундированием при включении номинальной нагрузки и при коротком замыкании в случае постоянной скорости вращения.

*Исходные данные.* Генератор явнополюсный с параметрами:  $x_d = 0,96$ ,  $x_q = 0,575$ ,  $x'_d = 0,2$ ,  $r_a = 0,014$ ; включаемая нагрузка  $z_H = 1$ ;  $\cos \varphi = 0,8$ ; короткое замыкание – на шинах генератора.

### Расчет провала напряжения

1. Полные сопротивления генератора и нагрузки

$$x_{дн} = 1,56, \quad x_{qn} = 1,175, \quad x'_{дн} = 0,8, \quad r_{ан} = 0,81.$$

2. Модуль комплекса полного сопротивления по (1.28)

$$z'_{qn} = \frac{x'_{дн} x_{qn} + r_{ан}^2}{\sqrt{x_{qn}^2 + r_{ан}^2}} = \frac{0,8 \cdot 1,175 + 0,81^2}{\sqrt{1,175^2 + 0,81^2}} = 1,125.$$

3. Аргумент комплекса полного сопротивления по (1.12)

$$\varphi_{qn} = \arctg \frac{x_{qn}}{r_{ан}} = \arctg \frac{1,175}{0,81} = 55^\circ 20'.$$

4. Провал напряжения и фаза вектора напряжения относительно ЭДС по (1.31) (ЭДС при х.х. генератора  $E'_q = 1$ )

$$\bar{U}_0 = \frac{z_H e^{j\varphi_H}}{z'_{qn} e^{j\varphi_{qn}}} E'_q = \frac{e^{j37^\circ}}{1,125 e^{j55^\circ 20'}} = 0,89 e^{-j18^\circ 20'}, \quad \Delta U_0 = 11\%.$$

### Расчет тока короткого замыкания

1. Модуль комплекса сопротивления генератора (вычисляется при равенстве нулю реактивной и активной нагрузок) по (1.30)

$$z'_{qк} = \frac{x'_d x_q + r_a^2}{\sqrt{x_q^2 + r_a^2}} = \frac{0,2 \cdot 0,575 + 0,014^2}{\sqrt{0,575^2 + 0,014^2}} = 0,201.$$

2. Аргумент комплекса полного сопротивления по (1.12)

$$\varphi_{qк} = \arctg \frac{x_q}{r_a} = \arctg \frac{0,575}{0,014} = 88^\circ 30'.$$

3. Амплитудное значение переходного тока короткого замыкания и фаза вектора тока относительно ЭДС по (1.27)

$$\bar{I}'_{к0} = \sqrt{2} \frac{\bar{E}'_q}{\bar{z}'_{qк}} = \sqrt{2} \cdot 5 e^{-j88^\circ 30'}, \quad I' = 7,05 I_{ном}.$$

**Пример 11.2.** Расчет изменения напряжения и частоты синхронного дизель-генератора с компаундированием при пуске электродвигателя прямым включением.

*Исходные данные.* Дизель  $N_{\max} = 165 \text{ л} \cdot \text{с}$ ;  $n_{\text{ном}} = 1500 \text{ об/мин}$ .

Автоматический регулятор скорости:  $T_k = 0,0175 \text{ с}$ ;  $\alpha_0 = 25^\circ$  ( $0,436 \text{ рад}$ );  $\delta_r = 0,02$ .

Генератор:  $P_r = 100 \text{ кВт}$ ;  $U_r = 230 \text{ в}$ ;  $I_r = 314 \text{ а}$ ;  $\cos \varphi_r = 0,8$ ;  $\eta_r = 0,907$ ;  $x_d = 1,25$ ;  $x'_d = 0,1$ ;  $x_q = 0,701$ ;  $r_a = 0,02$ ;  $T_{d0} = 1,63 \text{ с}$ ; напряжение возбуждения при холостом ходе по спрямленной характеристике  $5,5 \text{ В}$  ( $U_{B0} = 1$ ); предварительная нагрузка отсутствует. Система компаундирования: реактивное и активное сопротивления  $x_c = 0,05$ ,  $r_c = 0,01$ . Маховый момент вращающихся масс генераторного агрегата  $GD^2 = 44,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  ( $GD^2_{\text{диз}} = 25,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  и  $GD^2_r = 19 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ).

Электродвигатель:  $P_d = 41 \text{ кВт}$ ;  $U_d = 220 \text{ В}$ ;  $\cos \varphi_d = 0,875$ ,  $s_{\text{ном}} = 0,02$ ;  $s_{\text{кр}} = 0,143$ ;  $\eta_d = 0,87$ ;  $k_i = 6,5$ ; кратности пускового и максимального момента соответственно  $m_{\text{п}} = 1$ ,  $m_{\text{max}} = 2,1$ ; соединение обмоток – в треугольник; сопротивление цепи  $x_{\text{ц}} = 0$ ,  $r_{\text{ц}} = 0,03$ .

### Расчет

1. Приведенное к генератору сопротивление короткого замыкания фазы электродвигателя по (11.10)

$$z_d = \frac{\eta_d \cos \varphi_d P_r}{k_i \cos \varphi_r P_d} \left( \frac{U_d}{U_r} \right)^2 = \frac{0,87 \cdot 0,875 \cdot 100}{6,5 \cdot 0,8 \cdot 41} \left( \frac{220}{230} \right)^2 = 0,33.$$

2. Пусковое значение коэффициента мощности электродвигателя  $\cos \varphi_{\text{п}} = 0,32$  определяется по графику рис. 11.4 для  $s_{\text{кр}} = 0,143$ .

3. Реактивная и активная составляющие сопротивления электродвигателя

$$x_d = z_d \sin \varphi_{\text{п}} = 0,31; \quad r_d = z_d \cos \varphi_{\text{п}} = 0,105.$$

4. Сопротивления включаемой нагрузки и генератора

$$x_{\text{н}} = x_d + x_c = 0,36, \quad r_{\text{н}} = r_d + r_c + r_{\text{ц}} = 0,145,$$

$$x_{d\text{н}} = x_d + x_{\text{н}} = 1,61, \quad x'_{d\text{н}} = x'_d + x_{\text{н}} = 0,46,$$

$$x_{q\text{н}} = x_q + x_{\text{н}} = 1,06, \quad r_{\text{а\text{н}}} = r_a + r_{\text{н}} = 0,165,$$

$$z_H = \sqrt{x_H^2 + r_H^2} = 0,39, \quad \cos \varphi_{aH} = \frac{r_{aH}}{z_H} = 0,425.$$

5. Коэффициенты ЭДС генератора по (1.4), (1.22)

$$\xi = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2} = \frac{0,39 \sqrt{1,06^2 + 0,165^2}}{1,61 \cdot 1,06 + 0,165^2} = 0,24,$$

$$\xi' = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x'_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2} = \frac{0,39 \sqrt{1,06^2 + 0,165^2}}{0,46 \cdot 1,06 + 0,165^2} = 0,81.$$

6. Напряжение генератора в момент включения электродвигателя по (1.21)  $U_0 = \xi' E'_q = 0,81$  [ $E'_q = 1$  – для холостого хода; для генератора с предварительной нагрузкой  $E'_q$  вычисляется по (1.21) для параметров предварительной нагрузки].

7. Величина включаемой нагрузки на валу дизеля по (11.13)

$$\lambda = 1,36 \frac{U_{\text{ном}}^2 \cos \varphi_{aH}}{z_H \eta_{\Gamma} \cos \varphi_{\Gamma}} \left( \frac{P_{\Gamma}}{N_{\text{max}}} \right) = 1,36 \frac{1^2 \cdot 0,425}{0,39 \cdot 0,907 \cdot 0,8} \left( \frac{100}{165} \right) = 1,25.$$

8. Постоянная времени вращающихся масс агрегата и время запаздывания регулирующего импульса (по 3.18, а)

$$T_a = \frac{GD^2}{N_{\text{max}}} \left( \frac{n_{\text{ном}}}{518} \right)^2 = \frac{44,2}{165} \left( \frac{1500}{518} \right)^2 = 2,24 \text{ с},$$

$$\tau_p = \frac{30(\alpha_0 + 0,872)}{\pi \delta_r n_{\text{ном}} T_a} = \frac{30(0,436 + 0,872)}{3,14 \cdot 0,02 \cdot 1500 \cdot 2,24} = 0,186.$$

9. Расчетные коэффициенты механического процесса по (3.51) и (3.54)

$$D_d = T_k T_a = 0,0392 \text{ с}^2; \quad E_{\tau d} = \delta_r T_a (1 - \tau_p) = 0,0365 \text{ с};$$

$$a_0 = \delta_r T_a = 0,0448; \quad \alpha = \frac{E_{\tau d}}{2D_d} = 0,465;$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{D_d} - \alpha^2} = 5; \quad \rho = \sqrt{\left( \frac{1 - \alpha a_0}{\beta a_0} \right)^2} + 1 = 4,47.$$

10. Фазовые углы механического процесса по (3.54) и (11.16)

$$\psi = \arctg \frac{1 - \alpha a_0}{\beta a_0} = 1,35 \text{ рад}, \quad \psi_0 = \arctg \frac{\beta}{\alpha} = 1,5 \text{ рад}.$$

11. Максимальное отклонение скорости вращения дизеля и постоянная времени затухания механического процесса по (11.16), (11.17)

$$\begin{aligned} \varphi_{\max} &= \rho \lambda \delta \left[ e^{-\frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{\pi}{2} - \psi + \psi_0 \right)} \sin \psi_0 + \cos \psi \right] = \\ &= 4,47 \cdot 1,25 \cdot 0,02 \left[ e^{-\frac{0,465}{5} (1,57 - 1,35 + 1,5)} \sin 86^\circ + \cos 77^\circ \right] = 0,12, \end{aligned}$$

$$T_\psi = \frac{0,396}{\beta} \left( \frac{\pi}{2} - \psi + \psi_0 \right) = \frac{0,396}{5} (1,57 - 1,35 + 1,5) = 0,135 \text{ с.}$$

12. Расчетное уравнение изменения частоты генератора по формуле (11.18)

$$n(t) = 1 - \varphi(t) = 0,88 + 0,12e^{-7,4t}.$$

По этому уравнению рассчитан и построен график изменения частоты на рис. 11.8.

13. Возбуждение генератора для включаемой нагрузки по (1.5) при  $U_{\text{в max}} = i_{\text{в max}}$  и  $\xi_{\text{max}}$  из п. 5

$$U_{\text{в max}} = \frac{1}{\xi_{\text{max}}} = \frac{1}{0,24} = 4,16.$$

14. Расчетные коэффициенты уравнения переходного процесса генератора по (11.21)

$$k_1 = \frac{\xi'}{T_{d0}} = 0,5, \quad k_2 = \frac{\xi'}{\xi T_{d0}} = \frac{k_1}{\xi} = 2,1, \quad k_\psi = \frac{1}{T_\psi} = 7,4.$$

15. Расчетное уравнение изменения напряжения генератора по (11.20)

$$U(t) = 0,88 - 0,02e^{-2,1t} - 0,05e^{-7,4t}.$$

По этому уравнению рассчитан и построен график изменения напряжения на рис. 11.8. При правильно вычисленных коэффициентах уравнения для  $t = 0$  должно быть  $U(0) = U_0 = 0,81$ ; здесь  $U(0) = 0,81$ .