

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования
«Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых»
Кафедра электротехники и электроэнергетики

Максимов Ю.П.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ ПО
ДИСЦИПЛИНЕ
«Электромеханика»**

Направление подготовки: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: «Электроснабжение»

Уровень высшего образования: бакалавриат

Владимир 2015

Исходные данные по вариантам

Наименование параметров	Номер варианта																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
1. Назначение	синхронный генератор										! синхронный двигатель											
2. Номинальный режим работы	продолжительный (S1)																					
3. Номин. отдаваем. мощн.(кВт)	1000	630	500	400	315	400	250	200	132	110	200	132	90	55	160	75	90	55	37	30	15	
4. Кол-во фаз статора	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
5. Сп-б соединения фаз	звезда																					
6. Частота сети (Гц)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
7. Коэфф-т мощн (cos)	0,8 (отстающий)										! 0,9 (опережающий)											
8. Номин. линейное напряж.(В)	400	400	400	400	400	400	400	400	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	400
9. Частота вращения (об/мин)	1500	1000	750	600	500	1500	1000	750	600	500	1500	1000	750	600!	1500	750	1500	1000	1500	1000	1500	
																					1000	
																					1500	
10. Сп- возбуждения	От специальной обмотки, заложенной в пазы статора																					
11. Степень защиты от внешних воздействий											Все варианты IP 23											
12. Способ охлаждения											Все варианты IC01											
13. Исп-ие по сп-бу монтажа											Все варианты IM 1001											
14. Климатические условия и категория размещения	У2	У2	У2	У2	У2	У3	У3	У3	У3	У3	У4	У4	У4	!	У4	У4	У4	У4	У4	У4	У4	
15. Форма выступающего конца вала	цилиндрическая																					
16. Способ соединения с приводным механизмом или приводным двиг-лем	- упругая муфта																					
17. Кол-во пар полюсов	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6	2	3	4	5	!	2	4	2	3	2	3	2
18. Класс нагревостойкости изоляции	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Задание:

1. Спроектировать синхронную машину в соответствии со своим вариантом.
2. Представить в пояснительной записке расчеты на основе методических указаний приложения 2 (документ №2).
3. Начертить общий вид спроектированной синхронной машины с указанием основных узлов на формате А1.

Глава 11.

РАСЧЕТ СИНХРОННЫХ МАШИН

§ 11-1. Единые серии синхронных машин

Общие сведения. Синхронные машины применяют во многих отраслях народного хозяйства, в частности, в качестве генераторов в передвижных и стационарных электрических станциях, двигателей в установках, не требующих регулирования частоты вращения или нуждающихся в постоянной частоте вращения.

Наиболее распространена конструктивная схема синхронной машины с вращающимся ротором, на котором расположены явно выраженные полюсы. Иногда явнополюсные синхронные машины малой мощности (до 15 кВт) выполняют по конструктивной схеме машин постоянного тока, т. е. с полюсами, расположенными на статоре, коллектор заменяется контактными кольцами. Сейчас отечественная промышленность выпускает несколько общепромышленных и специальных серий синхронных машин.

Серия ЕСС. Трехфазные синхронные генераторы серии ЕСС изготовляют мощностью от 5 до 50 кВт при высоте оси вращения $h=180\div 315$ мм, в защищенном исполнении IP23, с самовентиляцией IC01, с частотой вращения 1500 об/мин. Эти генераторы предназначены для продолжительного режима работы в передвижных и стационарных электроустановках и в качестве источников трехфазного переменного тока напряжением 230 и 400 В, с частотой 50 Гц, с коэффициентом мощности, равным 0,8 (при отстающем токе), в условиях умеренного или тропического климата.

Генераторы серии ЕСС выполняют явнополюсными с самовозбуждением через полупроводниковые выпрямители и снабжают аппаратурой для автоматического регулирования напряжения, которая состоит из блока регулирования напряжения, корректора и потенциометра установки. Эта аппаратура обеспечивает точность поддержания напряжения на зажимах в пределах $\pm 2\%$ от среднерегулируемого значения при изменении нагрузки от нуля до номинальной величины и коэффициенте мощности в пределах от 1,0 до 0,8, при отклонении частоты вращения первичного двигателя от номинальной величины не более $\pm 3\%$ и при неизменной нагрузке не более $\pm 1\%$. Схема регулирования позволяет изменять установку напряжения в пределах от 100 до 95% U_n .

Генераторы допускают 10%-ную перегрузку по мощности в течение одного часа при номинальных значениях напряжения и коэффициента мощности; на х. х. обеспечивают пуск ненагруженного асинхронного двигателя, номинальная мощность которого не превышает 70% мощности генератора, при снижении напряжения, не превышающем 50% от номинального значения. Теплостойкость изоляционных материалов генераторов соответствует классу В; система вентиляции — аксиальная вытяжная. Приводными двигателями генераторов серии ЕСС могут служить дизельные, карбюраторные, газогенераторные и электрические двигатели, а также локомобили. Вращение передается через упругую муфту или клиноременную передачу.

Серии СД2 и СГ2. Синхронные двигатели серии СД2 и генераторы серии СГ2 изготавливают мощностью от 132 до 1000 кВт, при высоте оси вращения до 450 мм, в защищенном исполнении IP23, с самовентиляцией IC01, с частотой вращения от 500 до 1500 об/мин.

Двигатели используют для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (насосов, вентиляторов др.), и изготавливают на напряжения 380 и 6000 В, при частоте 50 Гц. Генераторы предназначены для выработки трехфазного переменного тока, напряжением 400 В, частотой 50 Гц на стационарных дизель-электрических станциях.

Электрические машины серий СД2 и СГ2 рассчитаны на продолжительный режим работы. Их возбуждение осуществляется от устройства, питающегося от дополнительной обмотки, заложенной в пазы статора. Нагревостойкость изоляционных материалов соответствует классу В. Ток возбуждения регулируют изменением угла зажигания тиристорных преобразователей возбуждательного устройства. Последние смонтированы в шкафах: в одном для двигателя и в двух для генератора. В шкафах размещены тиристорные преобразователи, элементы электронной системы управления, коммутационная аппаратура. Система управления двигателя осуществляет автоматическую подачу возбуждения в процессе пуска при спадающем токе статора до установленной величины, а также обеспечивает форсировку возбуждения при падении напряжения в главной цепи двигателя до 80—85% номинального. Отключается форсировка при увеличении напряжения сети до 90—95% номинального значения.

Обмотка возбуждения синхронного генератора получает выпрямленный ток через тиристорный и диодный преобразователи, соединенные параллельно на стороне выпрямленного тока. Тиристорный преобразователь питается от дополнительной обмотки, заложенной в пазы статора синхронного генератора, и в номинальном режиме работы генератора несет на себе около 30% нагрузки возбуждения. Остальную часть мощности возбуждения обеспечивает диодный преобразователь, питаемый от компаундирующего трансформатора, включенного в цепь статора, который служит для поддержания напряжения генератора при изменении нагрузки и в режиме короткого замыкания. Двигатели и генераторы имеют радиальную систему вентиляции, обеспечиваемую вентиляционным действием полюсов ротора и вентиляционными лопатками. Охлаждающий воздух при этом входит через вентиляционные окна в подшипниковых щитах, проходит по лобовым частям обмотки статора, через междуполюсное пространство ротора, радиальные каналы статора и выходит через боковые жалюзи станины.

Двигатели и генераторы допускают правое и левое направление вращения. Двигатели рассчитаны на прямой пуск при номинальном напряжении сети и допускают два пуска подряд из холодного состояния и один из нагретого.

§ 11-2. Исходные данные для проектирования

Для проектирования синхронных машин должны быть заданы следующие исходные данные: 1. Назначение — генератор или двигатель. 2. Номинальный режим работы по ГОСТ 183. 3. Номинальная отдаваемая мощность по ГОСТ 12139. 4. Количество фаз статора. 5. Способ соединения фаз статора (Δ ; Λ). 6. Частота напряжения. 7. Коэффициент мощности по ГОСТ 20550, 22407, ГОСТ 18200. 8. Номинальное линейное напряжение по ГОСТ 21128. 9. Частота вращения по ГОСТ 10683. 10. Способ возбуждения. 11. Степень защиты от внешних воздействий по СТ 247. 12. Способ охлаждения по ГОСТ 20459. 13. Исполнение по способу монтажа по СТ 246. 14. Климатические условия и категория размещения по ГОСТ 15150 и 15543. 15. Форма выступающего конца вала. 16. Способ соединения с приводным механизмом (для двигателей) или с приводным двигателем (для генераторов).

Кроме того, дополнительно используют данные о высоте оси вращения по ГОСТ 13267, установочно-присоединительных размерах по ГОСТ 18709 или 20839. Содержание перечисленных предписаний стандартов приведено в § 1-2. Во всем не оговоренном в исходных данных машины должны удовлетворять требованиям ГОСТ 183.

Примеры расчета машин.

1. Исходные данные для проектирования

Наименование заданных параметров и их условные обозначения	Синхронный генератор	Синхронный двигатель	
	Генератор Продолжительный	Двигатель (S1)	
Номинальная отдаваемая мощность P_2 , кВт	30	400	
Количество фаз статора m_1	3	3	
Способ соединения фаз статора	Λ	Λ	
Частота напряжения f , Гц	50	50	
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,8 (отстающий)	0,9 (опережающий)	
Номинальное линейное напряжение U_n , В	400	6000	
Частота вращения n_1 , об/мин	1500	750	
Способ возбуждения	От специальной обмотки, заложенной в пазы статора		
Степень защиты от внешних воздействий	IP23	IP23	
Способ охлаждения	IC01	IC01	
Исполнение по способу монтажа	IM1001	IM1001	
Климатические условия и категория размещения	У2	У4	
Форма выступающего конца вала	Цилиндрическая		
Способ соединения с приводным механизмом или приводным двигателем	Упругая муфта		
Количество пар полюсов	2	по (9-1)	4
Класс нагревостойкости изоляции	F		F

Дополнительные общие требования: высота оси вращения по ГОСТ 13267; установочно-присоединительные размеры по ГОСТ 8709 и ГОСТ 20839.

§ 11-3. Магнитная цепь машины.

Размеры, конфигурация, материал

Главные размеры. Проектирование синхронных машин начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра D_1 и длины l_1 сердечника статора.

Конструкция и метод расчета параметров статоров синхронных машин и асинхронных двигателей близки. Поэтому определение наружного диаметра $D_{н1}$ и главных размеров, а также конструктивной длины, марки стали, формы пазов и типа обмотки сердечни-

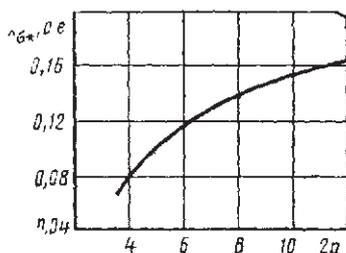


Рис. 11-1. Зависимость $x'_{\sigma^*} = f(2p)$

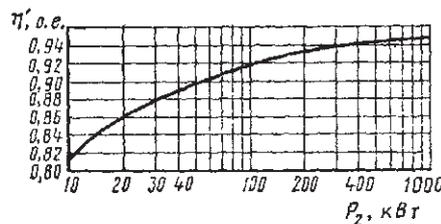


Рис. 11-2. Средние значения $\eta' = f(P_2)$

ка статора синхронных машин производится в соответствии с § 9-3. Синхронные машины малой и средней мощности общего назначения обычно выполняют со степенью защиты IP23, при способе охлаждения IC01.

Расчетную мощность P' определяют по (1-11) для двигателей и по (1-12) для генераторов. При этом значение коэффициента $k_n = E_s/U_1$ (зависящего главным образом от индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора x_{σ^*} (о. е.) и коэффициента мощности нагрузки) предварительно может быть определено по формуле

$$k_n \approx \sqrt{\cos^2 \varphi + (\sin \varphi + x'_{\sigma^*})^2}. \quad (11-1)$$

Предварительное значение x_{σ^*} можно найти по рис. 11-1. Для синхронных генераторов принимают $\cos \varphi = 0,8$ (при отстающем токе), а для двигателей $\cos \varphi = 0,9$ (при опережающем токе).

$U_{\Delta} = 6000 \div 6600$ В, полученное по указанным зависимостям значение D_1 должно быть уменьшено на 4%.

При определении расчетной длины сердечника статора l_1 синхронной машины по (1-31) предварительные значения линейной нагрузки A'_1 принимают из рис. 11-3, а магнитной индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке B'_δ — из рис. 11-4.

Данные, приведенные на рис. 11-3 и 11-4, соответствуют выполнению машин с изоляцией класса нагревостойкости F. При проектировании машины с изоляцией другого класса нагревостойкости значения A'_1 , полученные из рис. 11-3, умножают на поправочный коэффициент, равный 0,86 (при классе В) или 1,14 (при классе Н). Значения B'_δ при классах нагревостойкости изоляции В и Н остаются такими же, как и для класса F.

Расчетный коэффициент полюсной дуги α' , входящий в (1-31), зависит от ряда параметров, в том числе от воздушного зазора δ между статором и полюсными наконечниками. Этот зазор в значи-

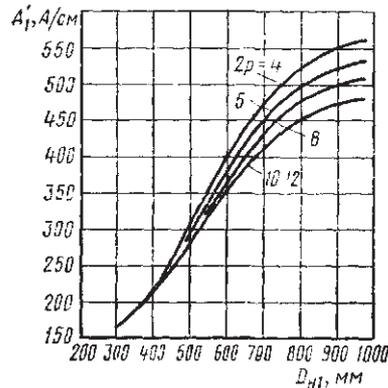


Рис. 11-3. Средние значения $A'_1 = f(D_{ст})$

тельной мере определяет технико-экономические показатели и характеристики синхронной машины. От значения δ зависит синхронное индуктивное сопро-

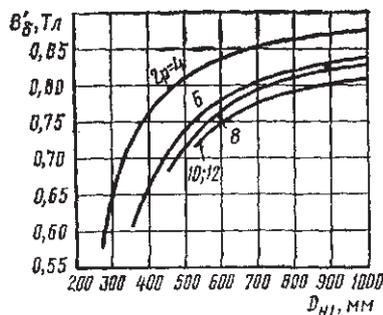


Рис. 11-4. Средние значения $B'_\delta = f(D_{ст})$

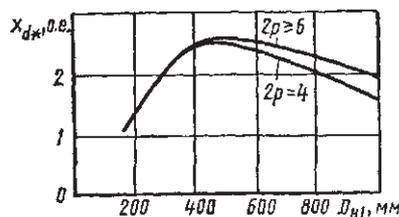


Рис. 11-5. Средние значения $x_{d*} = f(D_{ст})$

тивление машины по продольной оси x_d , которое влияет на величины максимального вращающего момента M_{\max} и установившегося тока короткого замыкания I_k ; с уменьшением δ увеличивается x_d и уменьшается M_{\max} и I_k . В современных синхронных машинах x_{d*} меняется в широких пределах.

Машины с повышенной перегрузочной способностью имеют больший зазор и $x_{d*} < 1,0$; при этом они более материалоемки, что связано прежде всего с заметным увеличением размеров обмотки

возбуждения полюсов и всей машины. Ориентировочно значение x_{d*} можно определить из рис. 11-5.

Для уменьшения влияния реакции якоря воздушный зазор между полюсным наконечником и сердечником статора синхронных машин делают значительно большим, чем в асинхронных. Воздушный зазор (мм)

$$\delta = 36 \cdot 10^{-6} \tau A'_1 / (x_{ad*} B'_{\delta 0} k'). \quad (11-2)$$

Здесь τ — полюсное деление сердечника статора, мм; x_{ad*} — индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси, о. е.; $B'_{\delta 0}$ — предварительное максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре машины при х.х. и номинальном напряжении, Тл; k' — коэффициент, учитывающий наличие зазоров в стыке полюса и сердечника ротора или полюсного наконечника и полюса. Обычно $k' = 1,04 \div 1,08$, меньшие значения k' относятся к машинам большей мощности. Полученное по (11-2) значение δ округляют до ближайшего числа, кратного 0,1 мм.

Диаметр сердечника статора и значение воздушного зазора синхронных машин определяют в такой последовательности.

Количество пар полюсов	p — по (9-1)	
Предварительное значение индуктивного сопротивления рассеяния (о. е.)	x'_{σ_0} — по рис. 11-1	
Коэффициент k_n	k_n — по (11-1)	
Предварительное значение КПД	η' — по рис. 11-2	
Расчетная мощность двигателя (кВт)	P' — по (1-11)	
То же, генератора	P' — по (1-12)	
Высота оси вращения (мм)	h — по табл. 11-1	
Допустимое расстояние от корпуса до опорной поверхности (мм)	h_1 — по рис. 1-1 и табл. 9-2	
Наружный диаметр корпуса (мм)	$D_{\text{корп}}$ — по (1-27)	
Максимально допустимый наружный диаметр сердечника статора (мм)	D_{imax} — по табл. 9-2	
Выбираемый наружный диаметр сердечника статора (мм)	D_{n1} — из § 11-3	
Внутренний диаметр сердечника статора (мм)	D_1 — из § 11-3	
Предварительное значение линейной нагрузки статора (А/см)	A'_1 — из рис. 11-3	
Предварительное значение магнитной индукции в воздушном зазоре в номинальном режиме (Тл)	B'_{δ} — из рис. 11-4	
Предварительное значение максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре машины при х. х. (Тл)	$B'_{\delta 0} = B'_{\delta} k_n$	(11-3)
Полюсное деление статора (мм)	τ — по (1-5)	
Индуктивное сопротивление машины по продольной оси (о. е.)	x_{d*} — по рис. 11-5	
Индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси (о. е.)	$x_{ad} = x_{d*} - x_{\sigma_0}$	(11-4)

Коэффициент, учитывающий наличие зазоров в стыке полюса и сердечника ротора или полюсного наконечника и полюса k' — по § 11-3

Расчетная величина воздушного зазора между полюсным наконечником и сердечником статора (мм) δ — по (11-2)

Для того чтобы форма поля возбуждения в воздушном зазоре между полюсным наконечником и сердечником статора приближалась к синусоиде, полюсным наконечникам придают определенную форму.

В синхронных машинах с $h=160\div 280$ мм для получения необходимой формы поля целесообразно применение гребенчатой конструкции полюсных наконечников (рис. 11-6) с равномерным воздушным зазором $0,7\text{--}2,0$ мм.

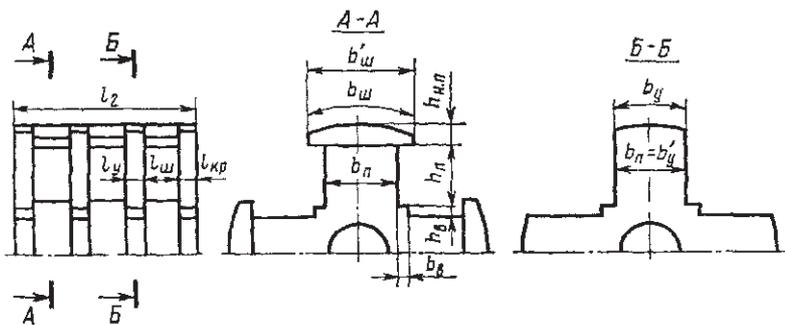


Рис. 11-6. Ротор с гребенчатой конструкцией полюсных наконечников

Соотношение между длинами чередующихся вдоль оси ротора пакетов сердечника полюса с узкими, l_y и широкими l_{sh} полюсными наконечниками (рис. 11-6) целесообразно принимать таким, чтобы суммарная длина пакетов с широкими полюсными наконечниками l_{sh} составляла около 70% полной длины полюса l_n , т.е. $l_{sh}/l_n \approx 0,7$ и $l_y/l_n \approx 0,3$; $l_{sh} = 20\div 30$ мм, $l_y \approx 0,3l_{sh}$.

Коэффициент полюсной дуги для пакетов с широкими полюсными наконечниками $a_{sh} \approx 0,77$, для пакетов с узкими полюсными наконечниками (включая крайние, ширина которых принимается равной ширине b_n сердечника полюса) $a_y \approx 0,35\div 0,4$.

При выборе соотношения между широкими b_{sh} и узкими b_y полюсными наконечниками следует руководствоваться зависимостью $b'_y/b'_m = f(\tau)$, приведенной на рис. 11-7.

В машинах с $h=315\div 450$ мм применяют эксцентричный воздушный зазор, при котором центры радиусов полюсной дуги и внутренней окружности сердечника статора не совпадают (рис. 11-8); в этом случае зазор имеет наименьшее значение δ' под

середине полюса, постепенно увеличивающееся до δ'' к краям полюсного наконечника. Для рассматриваемых машин обычно принимают $\delta'' = 1,5\delta'$; расчетный (эквивалентный) воздушный зазор в этом случае $\delta = 0,75\delta' + 0,25\delta''$. Коэффициент полюсной дуги

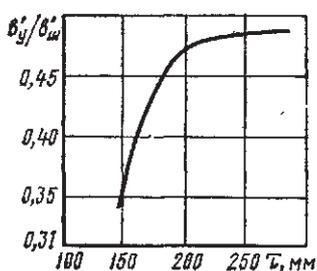


Рис. 11-7. Средние значения $b_y'/b_m' = f(\tau)$

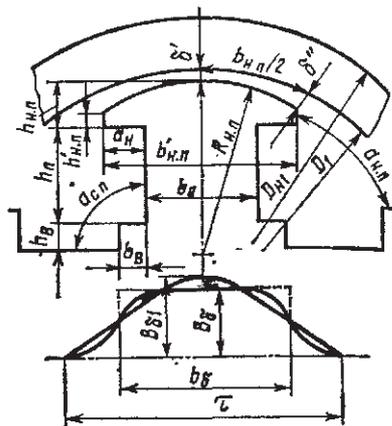


Рис. 11-8. Полюс с эксцентричным воздушным зазором

α в зависимости от количества полюсов и наружного диаметра статора приведен ниже:

Количество полюсов $2p$	4	6; 8	10; 12
Зависимость $\alpha = f(D_{н1})$, о. е.	$\alpha = 0,72 - 8,57 \times 10^{-5} D_{н1}$	$\alpha = 0,73 - 3,33 \times 10^{-5} D_{н1}$	$\alpha = 0,74 - 1,57 \times 10^{-5} D_{н1}$

Для определения расчетного коэффициента полюсной дуги α' (представляющего собой отношение расчетной полюсной дуги b'_δ к полюсному делению τ) значение b'_δ может быть найдено по кривой распределения магнитной индукции в воздушном зазоре вдоль окружности сердечника статора, что представляет собой весьма трудоемкую задачу. При гребенчатой конструкции и принятых соотношениях между l_m и l_y полюсных наконечников можно принять

$$\alpha' = 0,65 + (2,8\delta/\tau)/(1 + 3,4\delta/\tau) + (1,2\delta/\tau)/(1 + 4,4\delta/\tau). \quad (11-5)$$

Упрощенно значение α' при традиционной конструкции полюсных наконечников можно определить по рис. 11-9.

При выборе формы пазов и типа обмотки статоров синхронных машин можно руководствоваться табл. 9-4. При использовании двухслойной обмотки с укороченным шагом ($y \approx 0,83\tau$) обмоточный коэффициент $k_{ос} = 0,91$.

Расчетную длину сердечника статора l'_1 определяют по (1-31), с соответствующим округлением. Конструктивную длину сердеч-

ника статора l_1 при отсутствии в нем радиальных вентиляционных каналов принимают равной расчетной длине l'_1 .

Сердечники статора длиной более 300—350 мм собирают из отдельных пакетов с радиальными вентиляционными каналами между ними. В этом случае l_1 вычисляют по (1-33). Количество вентиляционных каналов n_k определяется длиной одного пакета сердечника статора $l_{п1}$, выбираемой в пределах 55—75 мм; длину вентиляционного канала $l_{к1}$ принимают равной 10 мм.

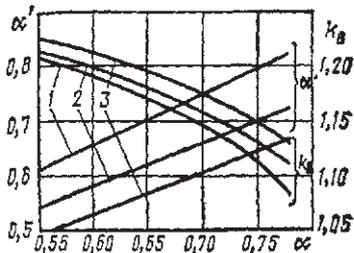


Рис. 11-9. Средние значения k_b и $\alpha' = f(\alpha)$:
1 — при $\delta'/\delta = 1$; 2 — при $\delta'/\delta = 1.5$; 3 — при $\delta'/\delta = 2$

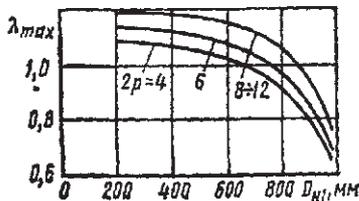


Рис. 11-10. Наибольшие значения $\lambda_{max} = f(D_{ш1})$

При определении главных размеров следует исходить также из соотношения $l_1/D_1 = \lambda$. Необходимо, чтобы λ не превышало предельно допустимого значения λ_{max} , приведенного на рис. 11-10.

Основные размеры магнитной цепи рассчитывают в такой последовательности.

Машина с гребенчатой конструкцией полюсных наконечников (см. рис. 11-6).

- | | | |
|--|---|---------|
| Коэффициент полюсной дуги для пакетов с широкими полюсными наконечниками | α_m — по § 11-3 | |
| Радиус очертания полюсного наконечника (мм) | $R_{п.л} = 0,5D_1 - \delta$ | (11-6) |
| Действительная ширина полюсной дуги в сечении пакета с широкими полюсными наконечниками (мм) | $b_m = \alpha_m r$ | (11-7) |
| Ширина полюсного наконечника, определяемая хордой в сечении пакета с широкими полюсными наконечниками (мм) | $b'_m = 2R_{п.л} \sin(0,5b_m/R_{п.л})$ | (11-8) |
| Отношение b'_y/b'_m | по рис. 11-7 | |
| Ширина полюсного наконечника, определяемая хордой в сечении пакета с узкими полюсными наконечниками (мм) | $b'_y = b'_m (b_y/b_m)$ | (11-9) |
| Действительная ширина полюсной дуги в сечении пакета с узкими полюсными наконечниками (мм) | $b_y = 2R_{п.л} \arcsin(0,5b'_y/R_{п.л})$ | (11-10) |

Действительный коэффициент полюсной дуги для пакетов с узкими полюсными наконечниками $\alpha_y = b_y / \tau$ (11-11)

Отношения $l_{ш\sigma} / l_{ш}$ и $l_{y\sigma} / l_{п}$ по § 11-3
 Коэффициент полюсной дуги: средний $\alpha = \alpha_{ш}(l_{ш\sigma} / l_{ш}) + \alpha_y(l_{y\sigma} / l_{п})$ (11-12)
 расчетный α' по (11-5)

Машина с эксцентричным воздушным зазором (по рис. 11-8)

Отношение максимальной величины зазора к минимальной δ'' / δ' — по § 11-3

Воздушный зазор по оси полюса (мм) $\delta' = \delta / 1,125$ (11-13)

То же, под краем полюсного наконечника $\delta'' = \delta / 0,75$ (11-14)

Коэффициент полюсной дуги: действительный α — по § 11-3
 расчетный α' — по рис. 11-9

Сердечник статора синхронных машин. Сердечник собирают из отдельных отштампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, имеющих изоляционное покрытие для уменьшения потерь от вихревых токов.

Толщина и марка электротехнической стали, применяемой для сердечника статора, виды изоляционных покрытий, а также форма пазов статора соответствуют указаниям § 9-3.

Количество зубцов статора z_1 и зубцовое деление t_1 (мм) связаны соотношением (9-22). Важным показателем при этом является количество зубцов статора, приходящееся на полюс и фазу q_1 , определяемое по (9-4).

Машины с $h = 160-280$ мм выполняют с дробным значением q_1 , а с $h = 315-450$ мм как с целым, так и с дробным значением q_1 . Для статоров многополюсных ($2p \geq 4$) синхронных машин (при $q_1 < 3$) обычно выбирают дробное значение q_1 . Если при этом представить q_1 в виде смешанного числа или обыкновенной дроби $q_1 = b + c/d$, где c/d — несократимая дробь, то должно соблюдаться условие: $2p/d = K$, где K — целое число, а $d \neq 3K$, т. е. не должно быть кратно числу фаз.

Количество зубцов статора z_1 определяют по (9-3). Для получения симметричной двухслойной обмотки должно соблюдаться условие

$$z_1 / (g m_1) = K, \quad (11-15)$$

где K — целое число; g — общий наибольший делитель чисел z_1 и p ; m_1 — количество фаз.

Рекомендуемые значения q_1 приведены ниже:

h , мм	160—180	200—225	250—280	315—450
$2p$	4 6	4 6	4 6	4 6 8 10 12
q_1	2,25 1,5	3,5 2,5	4,5 3	5 4 3 3 2,5

Сердечник статора рассчитывают в такой последовательности.

Марка, толщина (мм) и изолировка листов стали	по § 9-3	
Коэффициент заполнения сердечника статора сталью	k_c — по § 9-3	
Коэффициент формы поля возбуждения	k_n — по рис. 11-9	
Обмоточный коэффициент	$k_{об1}$ — по § 9-3	
Расчетная длина сердечника статора (с соответствующим округлением), мм	l'_1 — по (1-31)	
Количество пакетов стали в сердечнике статора	$n_{п1} = l'_1 / l_{п1}$	(11-16)
Длина пакета стали, мм	$l_{п1}$ — по § 11-3	
Количество радиальных вентиляционных каналов сердечника статора	$n_{к1} = n_{п1} - 1$	(11-17)
Конструктивная длина сердечника статора (мм)	l_1 — по (1-33), $l_{к1}$ — по § 9-3	
Отношение конструктивной длины к внутреннему диаметру сердечника статора	λ — по (9-2)	
Проверка по условию $\lambda < \lambda_{max}$	λ_{max} — по рис. 11-10	
Количество пазов на полюс и фазу	q_1 по § 11-3	
Количество пазов сердечника статора	z_1 — по (9-3)	
Проверка правильности выбора значения z_1	z_1 — по (11-15)	

Сердечники ротора и полюсов. Для генераторов с концентричным воздушным зазором и гребенчатой конструкцией полюсных наконечников суммарную длину пакетов с широкими полюсными наконечниками $l'_{ш\sigma}$ предварительно определяют по принятому соотношению $l'_{ш\sigma} / l_n$ (мм)

$$l'_{ш\sigma} = l_n (l_{ш\sigma} / l_n). \quad (11-18)$$

В таких машинах около 70% листов полюсных наконечников выполняют из тонколистовой электротехнической стали без изоляционного покрытия. Остальные собирают из листов углеродистой стали (например, У8А) толщиной 0,35—0,5 мм, также без изоляционного покрытия. Для повышения остаточной намагниченности эти листы подвергают термообработке; этим обеспечивают начальное самовозбуждение генератора без дополнительных устройств. Сердечник ротора набирают из штампованных вместе с полюсами листов электротехнической стали той же марки, которая применена в сердечнике статора, но без изоляционного покрытия и насаживают непосредственно на вал. Коэффициент заполнения стали k_c можно считать равным 0,97.

В синхронных машинах с $h = 315 \div 450$ мм, выполняемых с эксцентричным воздушным зазором под полюсными наконечниками, полюса изготовляют из листов стали марки Ст3 толщиной 1—2 мм без изоляционного покрытия и крепят к остову (сердечнику ротора) с помощью выступов Т-образной формы, или в виде ласточкиного хвоста. Сердечники роторов собирают из штампованных многогранных стальных листов той же марки толщиной 1—2 мм без

изоляционного покрытия (число граней сердечника соответствует числу полюсов). В этом случае принимают $k_c=0,98$. Остовы (сердечники) роторов четырехполюсных синхронных машин с $h=315-450$ мм обычно изготавливают из токовок вместе с валом.

Длину шихтованного сердечника полюса (мм) принимают

$$l_n=l_1+(10-15). \quad (11-19)$$

Крайние пакеты гребенчатого сердечника выполняют с узкими полюсными наконечниками. Их длину $l_{кр}=(l_n-l_{ш\sigma}-n_y l_y)/2$ принимают равной l_y или несколько больше. Длина одного пакета с широким полюсным наконечником $l_{ш}=l_{ш\sigma}/n_{ш}$, а с узким $l_y \approx (l_n-l_{ш\sigma})/(n_y+n_{кр})$. Здесь $n_{ш}$, n_y , $n_{кр}$ — количество пакетов сердечника полюса соответственно с широкими, узкими и крайними полюсными наконечниками.

В машинах с $h \leq 280$ мм длину сердечника ротора по оси принимают равной длине сердечника полюса, т. е. $l_2=l_n$, а при $h=315-450$ мм:

$$l_2=l_1+(10-20). \quad (11-20)$$

Предварительное значение магнитного потока в номинальном режиме Φ' (Вб) определяют по (9-14).

Ширина сердечника полюса (мм)

$$b_n=\sigma'\Phi' \cdot 10^8 / (k_c l_n B'_n). \quad (11-21)$$

Здесь магнитная индукция в основании сердечника полюса $B'_n=1,4-1,6$ Тл.

Предварительное значение коэффициента магнитного рассеяния полюсов

$$\sigma' \approx 1 + k_\sigma 35\delta / \tau^2. \quad (11-22)$$

Поправочный коэффициент k_σ зависит от высоты полюсного наконечника $h_{н.п}$ [см. (11-29)] и расчетного коэффициента полюсной дуги α' . При $\alpha' \geq 0,7$

$$k_\sigma = 1,3h_{н.п} + 30, \quad (11-23)$$

при $\alpha' < 0,7$

$$k_\sigma = 1,25h_{н.п} + 25. \quad (11-24)$$

Ширина дуги полюсного наконечника (мм)

$$b_{н.п} = \alpha \tau. \quad (11-25)$$

Радиус очертания полюсного наконечника при эксцентричном воздушном зазоре (мм)

$$R_{н.п} = D_1 / [2 + 8D_1(\delta'' - \delta') / b_{н.п}^2]; \quad (11-26)$$

то же, при концентричном воздушном зазоре

$$R_{н.п} = 0,5D_1 - \delta. \quad (11-27)$$

Ширина полюсного наконечника (мм), определяемая хордой,

$$b'_{н.п} = 2R_{н.п} \sin[0,5b_{н.п} / (R_{н.п})]. \quad (11-28)$$

Высота полюсного наконечника по оси полюса для машин с эксцентричным зазором (рис. 11-8) (мм)

$$h_{н.п} = h'_{н.п} + R_{н.п} - \sqrt{R_{н.п}^2 - (0,5b'_{н.п})^2}. \quad (11-29)$$

При определении $h_{н.п}$ для синхронных машин с гребенчатой конструкцией полюсных наконечников (рис. 11-6) в (11-29) вместо $b'_{н.п}$ следует подставить $b'_{ш}$.

Высота полюсного наконечника у его края $h'_{н.п} = 3-20$ мм (выбирается по конструктивным соображениям); при этом следует иметь в виду, что с ростом $h_{н.п}$ возрастают рассеяние полюсов и переходное индуктивное сопротивление x'_d , а это приводит к ухудшению динамической устойчивости и удорожанию машины.

Для машин с $h = 160+280$ мм и $2p=4$ предварительная высота полюсного сердечника (мм)

$$h'_{п} \approx 0,5D_1 - (h_{н.п} + \delta + h_b + 0,5b_n). \quad (11-30)$$

Здесь высота и ширина выступа у основания полюсного сердечника (рис. 11-6) (мм)

$$h_b = b_b = 0,125b_n + 2. \quad (11-31)$$

Для машин с $h = 315+450$ мм (рис. 11-8)

$$h'_{п} = 10,5\delta' + 0,18D_1. \quad (11-32)$$

Размер $h'_{п}$ уточняют после расчета обмотки возбуждения и вычерчивания эскиза расположения катушек возбуждения в междуполюсном окне.

Предварительно внутренний диаметр сердечника ротора (мм)

$$D'_2 = d_b = k_b \sqrt{P_2/n_1}. \quad (11-33)$$

Здесь P_2 — номинальная мощность, Вт; n_1 — частота вращения, об/мин.

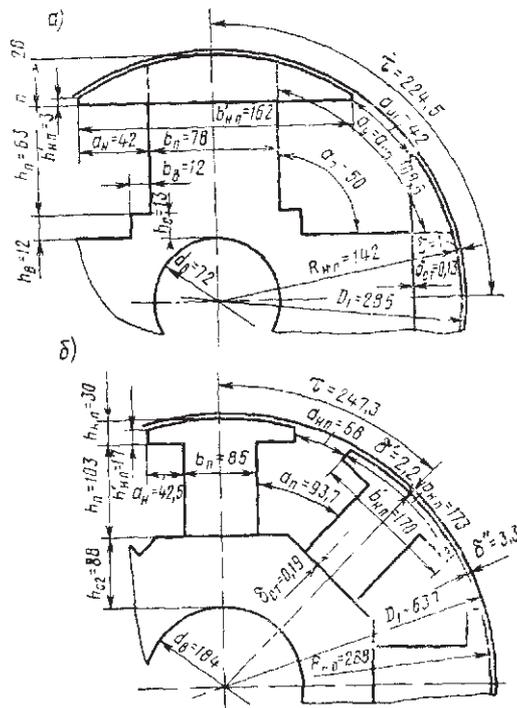


Рис. 11-11. Эскизы роторов к примерам расчета:

а — генератора; б — двигателя

Коэффициент k_n определяют в зависимости от D_1 :

D_1 , мм	150	200	250	300	350	400	450	500	650
k_n , о. е.	32	30	28,3	27	26	25	24,5	24	22,6

После расчета вала на жесткость уточняют размер D'_2 . Конструкция сердечника ротора и размеры его поперечного сечения в большинстве случаев определяются требованиями к его механической прочности, поэтому магнитная индукция в спинке ротора B_{c2} часто получается малой. В тихоходных машинах ($2p \geq 8$) сечение обода проверяется по допустимой индукции $B_{c2} \leq 1,3$ Тл.

Высота спинки ротора (мм)

$$h_{c2} = 0,5D_1 - \delta - h'_{п} - h_{н.п} - 0,5D'_2. \quad (11-34)$$

Расчетная высота спинки ротора с учетом прохождения части магнитного потока по валу (мм)

$$h'_{c2} = h_{c2} + 0,5D'_2. \quad (11-35)$$

Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)

$$B_{c2} = \Phi' \cdot 10^6 / (2h'_{c2} l_1 k_c). \quad (11-36)$$

Эскизы роторов рассчитываемых синхронных машин приведены в качестве примера на рис. 11-11, а, б.

Примеры расчета машин

2. Магнитная цепь машин. Размеры, конфигурация, материалы

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
----------------------------	----------------------	----------	----------------------	----------------------

Принимаем изоляцию класса нагревостойкости F

1	p	(9-1)	$60 \cdot 50 / 1500 = 2$	$60 \cdot 50 / 750 = 4$
2	x'_{σ_2} , о. е.	рис. 11-1	0,08	0,14
3	k_n	(11-1)	$\sqrt{0,8^2 + (0,6 + 0,08)^2} = 1,05$	$\sqrt{0,9^2 + (0,44 + 0,14)^2} = 1,07$
4	γ'_1 , о. е.	рис. 11-2	0,88	0,94

Главные размеры

5	P' , кВ·А	(1-11)	—	$\frac{1,07 \cdot 400}{0,94 \cdot 0,9} = 506$
6	P' , кВ·А	(1-12)	$1,05 \cdot 30 / 0,8 = 39,4$	—
7	h , мм	табл. 11-1	225	450
8	h_1 , мм	табл. 9-2	7	9
9	$D_{корп}$, мм	(1-27)	$2(225 - 7) = 436$	$2(450 - 9) = 882$
10	$D_{н1 \max}$, мм	табл. 9-2	406	850
11	$D_{н1}$, мм	§ 11-3	406	850

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
12	D'_1 , мм	§ 11-3	$6 + 0,69 \cdot 406 = 286$	$43 + 0,72 \cdot 850 = 656$
13	D_1 , мм	§ 11-3	286	$655 \cdot 0,96 \approx 630$
14	A'_1 , А/см	рис. 11-3	220	480
15	B'_3 , Тл	рис. 11-4	0,77	0,82
16	B'_{30} , Тл	(11-3)	$0,77/1,05 = 0,73$	$0,82/1,07 = 0,77$
17	τ , мм	(1-5)	$3,14 \cdot 286/4 = 224,5$	$3,14 \cdot 630/8 = 247,3$
18	x_{d+} , о. е.	рис. 11-5	2,5	2,2
19	x_{ad+} , о. е.	(11-4)	$2,5 - 0,08 = 2,42$	$2,2 - 0,14 = 2,06$
20	k' , о. е.	§ 11-3	1,07	1,05
21	δ , мм	(11-2)	$36 \cdot 10^{-6} \times$ $\frac{224,5 \cdot 220}{2,42 \cdot 0,73 \cdot 1,07} =$ $= 0,94$	$36 \cdot 10^{-6} \times$ $\frac{247,3 \cdot 480}{2,06 \cdot 0,77 \cdot 1,05} = 2,56$
22	δ , мм	§ 11-3	1,0	2,5
23	Форма зазора	§ 11-3	Концентричная по рис. 11-6	—
24	δ''/δ'	§ 11-3	1,0	—
25	$\alpha_{ш}$	§ 11-3	0,77	—
26	$R_{н.п.}$, мм	(11-6)	$0,5 \cdot 286 - 1 = 142$	—
27	$b_{ш}$, мм	(11-7)	$0,77 \cdot 224,5 = 173$	—
28	$b'_{ш}$, мм	(11-8)	$2 \cdot 142 \sin [173/(2 \times$ $\times 142)] = 162$	—
29	$b_y/b_{ш}$	рис. 11-7	0,48	—
30	b'_y , мм	(11-9)	$162 \cdot 0,48 = 78$	—
31	b_y , мм	(11-10)	$2 \cdot 142 \arcsin (0,5 \times$ $\times 78/142) = 79$	—
32	α_y	(11-11)	$79/224,5 = 0,35$	—
33	$l_{ш\sigma}/l_{ш}$	§ 11-3	0,7	—
34	$l_{шy}/l_{ш}$	§ 11-3	0,3	—
35	α	(11-12)	$0,77 \cdot 0,7 + 0,35 \cdot 0,3 =$ $= 0,65$	—
36	α'	(11-5)	$0,65 +$ $\frac{2,8 \cdot 1/224,5}{1 + 3,4 \cdot 1/224,5} +$ $\frac{1,2 \cdot 1/224,5}{1 + 4,4 \cdot 1/224,5} =$ $= 0,66$	—

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
37	Форма зазора	§ 11-3	—	Эксцентричная по рис. 11-8
38	δ''/δ'	§ 11-3	—	1,5
39	δ' , мм	(11-13)	—	$2,5/1,125 = 2,2$
40	δ'' , мм	(11-14)	—	$2,5/0,75 = 3,3$
41	α	§ 11-3	—	$0,73 - 3,33 \cdot 10^{-6} \cdot 850 =$
42	α'	рис. 11-9	—	$= 0,7$ 0,66

Сердечник статора

43	Марка стали, изолировка листов	§ 9-3	2013, оксидирование	2312, лакировка
44	Толщина стали, мм	§ 9-3	0,5	0,5
45	k_c	§ 9-3	0,97	0,95
46	k_b	рис. 11-9	1,17	1,15
47	$k_{обл}$	§ 11-3	0,91	0,91
48	l'_1 , мм	(1-31)	$\frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot 39,4 \cdot 10^3}{286^3 \cdot 1500 \cdot 220 \cdot 0,77} \times$ $\times \frac{1}{0,66 \cdot 1,17 \cdot 0,91} =$ $= 162$	$\frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot 506 \cdot 10^3}{630^3 \cdot 750 \cdot 480 \cdot 0,82} \times$ $\times \frac{1}{0,66 \cdot 1,15 \cdot 0,91} = 383$
49	l'_1 , мм	§ 11-3	160	385
50	$l_{ш1}$, мм	§ 11-3	—	55
51	$n_{ш1}$	(11-16)	1	$385/55 = 7$
52	$l_{к1}$, мм	§ 11-3	—	10
53	$n_{к1}$	(11-17)	—	$7 - 1 = 6$
54	l_1 , мм	(1-33)	160	$385 + 6 \cdot 10 = 445$
55	λ	(9-2)	$160/286 = 0,56$	$445/630 = 0,71$
56	λ_{max}	рис. 11-10	$1,07 > 0,56$	$1,02 > 0,71$
57	q_1	§ 11-3	3,5	3
58	z_1	(9-3)	$2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3,5 = 42$	$2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 3 = 72$
59	Проверка z_1	(11-15)	$42/(2 \cdot 3) = 7 = \text{ц. ч.}$	$72/(4 \cdot 3) = 6 = \text{ц. ч.}$

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
Сердечник ротора				
60	Марка стали	§ 9-3, 11-3	2013	Ст. 3
61	Толщина листов	§ 11-3	0,5	1,5
62	Изолировка листов	§ 11-3	Без изоляции	Без изоляции
63	k_c	§ 11-3	0,97	0,98
64	l_2 , мм	(11-20)	$160 + 10 = 170$	$445 + 15 = 460$
Сердечник полюса и полюсный наконечник				
65	Марка стали	§ 11-3	2013; У8А	Ст 3
66	Толщина листов, мм	§ 11-3	0,5	1,5
67	Изолировка листов	§ 11-3	Без изоляции	Без изоляции
68	k_c	§ 11-3	0,97	0,98
69	$l_{ш}$, мм	(11-19)	$160 + 10 = 170$	$445 + 15 = 460$
70	$l_{ш\sigma}/l_{ш}$	§ 11-3	0,7	—
71	$l_{ш\sigma}$, мм	(11-18)	$170 \cdot 0,7 = 120$	—
72	$n_{ш}$	§ 11-3	5	—
73	n_y	§ 11-3, рис. 11-6	4	—
74	$n_{кр}$	§ 11-3	2	—
75	$l_{ш}$, мм	§ 11-3	$120/5 = 24$	—
76	l_y , мм	§ 11-3	$(170 - 120)/(4 + 2) = 8$	—
77	$l_{кр}$, мм	§ 11-3	$(170 - 120 - 4 \cdot 8)/2 = 9$	—
78	$B'_{ш}$, Тл	§ 11-3	1,45	1,45
79	Φ' , Вб	(9-14)	$\frac{0,77 \cdot 286 \cdot 160 \cdot 10^{-6}}{2} = 17,6 \cdot 10^{-3}$	$\frac{0,82 \cdot 630 \cdot 385 \cdot 10^{-6}}{4} = 49,7 \cdot 10^{-3}$
80	$b_{н.ш}$, мм	(11-25)	$0,77 \cdot 224,5 = 173$	$0,7 \cdot 247,3 = 173$
81	$R_{н.п}$, мм	(11-26)	—	$630 / \left[2 + \frac{8 \cdot 630 (3,3 - 2,2)}{173^2} \right] = 288$
82	$R_{н.п}$, мм	(11-27)	$0,5 \cdot 286 - 1,0 = 142$	—
83	$b_{н.ш}$, мм	(11-28)	—	$2 \cdot 288 \sin(0,5 \cdot 173/288) = 170$

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источн к	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
84	$h'_{н.ш.}$ мм	§ 11-3	3	17
85	$h_{н.ш.}$ мм	(11-29)	$3+142-$ $-\sqrt{142^2-(0,5 \cdot 162)^2} =$ $=28$	$17+288-$ $-\sqrt{288^2-(0,5 \cdot 170)^2} = 30$
86	k_α	(11-24)	$1,25 \cdot 28 + 25 = 60$	$1,25 \cdot 30 + 25 = 62,5$
87	σ' , о. е.	(11-22)	$1+60 \cdot \frac{35 \cdot 1,0}{224,5^2} = 1,04$	$1+62,5 \cdot \frac{35 \cdot 2,5}{247,3^2} = 1,09$
88	$b_{п.}$ мм	(11-21)	$\frac{1,04 \cdot 17,6 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{0,97 \cdot 170 \cdot 1,45} = 78$	$\frac{1,09 \cdot 49,7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{0,98 \cdot 460 \cdot 1,45} = 85$
89	$h_{в.}$ мм	(11-31)	$0,125 \cdot 78 + 2 = 12$	—
90	$h'_{ш.}$ мм	(11-30)	$0,5 \cdot 286 - (28 + 1 +$ $+ 12 + 0,5 \cdot 78) = 63$	—
91	$h'_{п.}$ мм	(11-32)	—	$10,5 \cdot 2,2 + 0,18 \cdot 630 = 103$
92	D'_2 мм	(11-33)	$27 \sqrt[3]{30 \cdot 10^3 / 1500} = 72$	$22,7 \sqrt[3]{400 \cdot 10^3 / 750} = 184$
93	$h_{св.}$ мм	(11-34)	$0,5 \cdot 286 - 1 - 63 - 28 -$ $- 0,5 \cdot 72 = 13$	$0,5 \cdot 630 - 2,5 - 103 - 30 -$ $- 0,5 \cdot 184 = 88$
94	$h'_{св.}$ мм	(11-35)	$13 + 0,5 \cdot 72 = 49$	$88 + 0,5 \cdot 184 = 180$
95	$B_{св.}$ Тл	(11-36)	$\frac{17,6 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 49 \cdot 170 \cdot 0,97} = 1,09$	$\frac{49,7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 180 \cdot 445 \cdot 0,98} = 0,32$

§ 11-4. Обмотка статора

Типы обмоток и общие положения. Статорные обмотки синхронных машин обычно выполняют шестизонными петлевыми двухслойными из мягких секций или из жестких катушек. При выборе типа обмоток и формы пазов статора синхронных машин с различными высотами оси вращения следует руководствоваться рекомендациями § 9-4 и в частности табл. 9-4. При этом укорочение шага обмотки статора по пазам

$$\beta_l = 2p y_{nl} / z_l. \quad (11-37)$$

В синхронных машинах с $h=160-450$ мм широко распространена система возбуждения полюсов от дополнительных обмоток, закладываемых в пазы статора с тем же шагом, что и основная обмотка; иногда в машинах с $h \leq 280$ мм шаг дополнительной обмотки устанавливают, исходя из условия использования третьей гармоники поля. Дополнительную обмотку обычно выполняют трехфазной, однослойной из того же провода, что и основную. В машинах с $h=315-450$ мм ее укладывают на дно паза, а в машинах с $h \leq 280$ мм — сверху, под клином, после укладки основной обмотки. Вместе с изоляцией дополнительная обмотка занимает до 20% объема паза. Параметры дополнительной обмотки выби-

рают, исходя из условия обеспечения не менее 30% номинальной нагрузки цепи возбуждения (остальная часть нагрузки цепи возбуждения покрывается за счет основной обмотки). Для синхронных машин с $h \leq 450$ мм номинальное напряжение цепи возбуждения $U_n = 25 \div 100$ В. Более высокое напряжение возбуждения принимают для машин меньшей мощности, в которых обычно применяют многослойные катушки возбуждения с относительно большим сопротивлением.

По аналогии с (9-17) количество витков дополнительной обмотки статора

$$w_d = N_d p q_1 / a_d, \quad (11-38)$$

где N_d — количество эффективных проводников в пазу; a_d — количество параллельных ветвей фазы дополнительной обмотки.

Параллельные ветви дополнительной обмотки применяют при больших значениях тока возбуждения, требующих значительной площади поперечного сечения проводников. При этом в каждой параллельной ветви должно быть одинаковое количество витков, а стороны катушек находятся в магнитном поле в одинаковых условиях.

Для машин с $h \leq 280$ мм количество эффективных проводников дополнительной обмотки в пазу чаще всего принимают $N_d = 2$, а для машин с $h = 315 \div 450$ мм — $N_d = 1$. При определении количества элементарных проводников дополнительной обмотки c_d в одном эффективном руководствуются теми же положениями, что и для основной обмотки. Размеры и количество элементарных проводников основной и дополнительной обмоток, укладываемых по ширине $S_{о.ш}$, $S_{д.ш}$ и по высоте паза $S_{о.в}$, $S_{д.в}$, выбирают с учетом рационального заполнения площади паза и рекомендаций гл. 9.

Предварительное значение номинального фазного тока двигателя (А)

$$I'_1 = P_2 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} U_n \eta' \cos \varphi'); \quad (11-39)$$

для генератора

$$I'_1 = P_2 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} U_n \cos \varphi'). \quad (11-40)$$

Параметры общие для любой обмотки статора синхронных машин определяют по формулам § 9-4 (указания для дополнительной обмотки приведены в настоящем параграфе).

Обмотка статора с трапецидальными полузакрытыми пазами. Предварительное среднее значение магнитной индукции в зубцах $B_{з1}$ следует выбирать из табл. 9-16, но со снижением на 5—10%.

Размеры трапецидальных пазов определяют по (9-24) — (9-34). При этом следует иметь в виду, что площадь поперечного сечения паза $S''_{п1}$, вычисленная по (9-33), в синхронных машинах с самовозбуждением используется для размещения как основной, так и дополнительной обмоток. В этом случае при определении суммарной площади поперечного сечения изоляционных прокладок между верхней и нижней катушками в пазу, на дне паза и под клином должна быть учтена также прокладка между дополнительной и основной обмотками; суммарная площадь поперечного

сечения прокладок (мм²)

$$S_{\text{пр}} = 0,5b_1 + b_2. \quad (11-41)$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения основной обмотки (мм²)

$$S''_{\text{п.о}} = (0,8 \div 0,9) S''_{\text{п1}}. \quad (11-42)$$

Площадь поперечного сечения эффективного проводника основной обмотки (мм²)

$$S_0 = S c. \quad (11-43)$$

Здесь S — площадь поперечного сечения элементарного проводника, мм²; c — количество элементарных проводников в одном эффективном.

Площадь паза (мм²), используемая для размещения дополнительной обмотки,

$$S''_{\text{п.д}} = (0,1 \div 0,2) S''_{\text{п1}} \quad (11-44)$$

(при соблюдении условия $S''_{\text{п1}} = S''_{\text{п.о}} + S''_{\text{п.д}}$), а соответствующая ей часть высоты паза (мм)

$$h_{\text{п.д}} = (0,1 \div 0,2) h_{\text{п1}}. \quad (11-45)$$

Для определения диаметра изолированного обмоточного провода d' (мм) задаются предварительным значением коэффициента заполнения паза k'_n , который не должен превышать 0,75 при ручной укладке обмотки и 0,72 при машинной (с использованием статоробмоточных станков);

$$d' = \sqrt{k'_n S''_{\text{п.о}} / (N_{\text{п1}} c)}, \quad (11-46)$$

где $N_{\text{п1}}$ — количество эффективных проводников основной обмотки в пазу.

Количество элементарных проводников c в одном эффективном выбирают так, чтобы диаметр провода с изоляцией не превышал 1,71 мм при ручной укладке и 1,33 мм при машинной. По приложению 1 находят ближайший стандартизированный диаметр изолированного провода d' , соответствующий ему диаметр неизолированного провода d и площадь его поперечного сечения S .

Площадь поперечного сечения эффективного проводника дополнительной обмотки (мм²)

$$S_{\text{д.эф}} = S_{\text{д}} c_{\text{д}}, \quad (11-47)$$

где $S_{\text{д}}$ — площадь поперечного сечения элементарного проводника дополнительной обмотки, мм²; $c_{\text{д}}$ — количество элементарных проводников в одном эффективном.

Коэффициент заполнения паза

$$k_n = [N_{\text{п1}} c (d')^2 + N_{\text{д}} c_{\text{д}} (d'_{\text{д}})^2] / S''_{\text{п1}}. \quad (11-48)$$

Здесь $d'_{\text{д}}$ — диаметр изолированного проводника дополнительной обмотки (среднюю длину витка дополнительной обмотки можно принять равной средней длине витка основной обмотки).

Плотность тока в обмотке статора и уровень удельной тепловой нагрузки в ней определяют по методике, изложенной в § 9-4, при этом выбирают плотность тока в основной и дополнительной обмотках одинаковыми.

Показателем, характеризующим удельную тепловую нагрузку статора, служит произведение линейной нагрузки A_1 на плотность тока J_1 в обмотке. Допустимые значения $A_1 J_1$ для синхронных машин в защищенном исполнении с самовентиляцией, выполненных с изоляцией класса нагревостойкости F, приведены на рис. 11-12. В случае применения изоляционных материалов иного класса нагревостойкости полученные по рис. 11-12 значения $A_1 J_1$ следует умножить на поправочный коэффициент, равный 0,75 (при классе В) или 1,3 (при классе Н).

Конструкция изоляции обмотки статора из круглого провода в трапецидальных полужакрытых пазах приведена в приложении 27.

Последовательность расчета обмотки статора с трапецидальными полужакрытыми пазами такая же, как и для асинхронных двигателей (с учетом дополнений, приведенных в настоящем параграфе).

Обмотка статора с прямоугольными полуоткрытыми и открытыми пазами. Размеры полуоткрытых и открытых прямоугольных пазов синхронных машин и параметры обмотки статора определяют по методике, изложенной в § 9-4. При этом следует иметь в виду, что максимальные значения магнитной индукции в наиболее узком месте зубца B_{31max} , приведенные в табл. 9-16, принимают для синхронных машин со снижением на 5—10%.

Допустимая высота эффективного проводника с витковой изоляцией (мм)

$$a'_{эф} = (c_0 h_{п1} - h_n - h_k - h_{ш} - h_c) / N_{в}, \quad (11-49)$$

где $c_0 = 0,85 \div 0,95$ — коэффициент, учитывающий наличие в пазу дополнительной обмотки.

Размеры основной и дополнительной обмоток статора по высоте паза (мм)

$$h_{п.о} = N_{в.о} c_{о.в} (a + \Delta_{п.а}) + h_{н.о}; \quad (11-50)$$

$$h_{п.д} = N_{в.д} c_{д.в} (a + \Delta_{п.а}) + h_{н.д}. \quad (11-51)$$

Здесь $c_{о.в}$ и $c_{д.в}$ — количество элементарных проводников (соответственно основной и дополнительной обмоток) в одном эффективном по высоте пазе; $h_{н.о}$ и $h_{н.д}$ — толщина изоляции основной и дополнительной обмоток по высоте паза.

Проверка возможности размещения обмотки и уточненная высота паза статора в штампе (мм)

$$h_{п1} = h_{п.о} + h_{п.д} + h_k + h_{ш} + h_c. \quad (11-52)$$

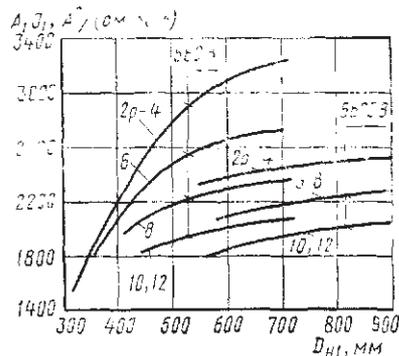


Рис. 11-12. Средние значения $A_1 J_1 = f(D_{ст})$

Показатели, характеризующие удельную тепловую нагрузку ($A_1 J_1$) статора, определяют так же, как при трапецидальных полузакрытых пазах. Средние допускаемые значения $(A_1 J_1)_{\text{доп}}$ для обмотки статора с прямоугольными полуоткрытыми и открытыми пазами приведены на рис. 11-12.

Конструкция изоляции обмотки статора из прямоугольного провода, расположенного в полуоткрытых или в открытых пазах, приведена в приложениях 28 и 30.

Последовательность расчета обмотки статора с прямоугольными полуоткрытыми пазами такая же, как для асинхронных двигателей (с учетом дополнений, приведенных в настоящем параграфе).

Примеры расчета машин

3. Обмотка статора. Параметры, общие для обмоток

Для генератора принимаем двухслойную петлевую обмотку с мягкими секциями (см. табл. 9-4) из провода марки ПЭТ-155 (класс нагревостойкости F), укладываемую в трапецидальные полузакрытые пазы (Приложение 27,а). Для двигателя принимаем двухслойную петлевую обмотку с жесткими секциями (см. табл. 9-4) из провода марки ПЭП-155 (класс нагревостойкости F), укладываемую в прямоугольные открытые пазы (Приложение 30,б).

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
96	k_{p1}	(9-9)	$0,5 [3,5 \sin(60^\circ) (2 \times 3,5)] = 0,96$	$0,5 [3 \sin(60^\circ / 2 \cdot 3)] = 0,96$
97	β'_1	§ 9-4	0,8	0,8
98	$Y'_{п1}$ (реальные пазы)	(9-11)	$0,8 \cdot 42 (2 \cdot 2) = 8,4$	$0,8 \cdot 72 / (2 \cdot 4) = 7,2$
99	$Y_{п1}$ (реальные пазы)	§ 9-4	8	8
100	β_1	(11-37)	$2 \cdot 2,8,42 = 0,702$	$2 \cdot 4 \cdot 8,72 = 0,89$
101	k_{y1}	(9-12)	$\sin(0,762 \cdot 90^\circ) = 0,93$	$\sin(0,89 \cdot 90^\circ) = 0,98$
102	$k_{об1}$	(9-13)	$0,96 \cdot 0,93 = 0,89$	$0,96 \cdot 0,98 = 0,94$
103	w'_1	(9-15)	$\frac{1,05}{222 \cdot 0,89 (50/50)} \times$ $\frac{400}{17,6 \cdot 10^{-3} \sqrt{3}} = 6,97$	$\frac{1,07}{222 \cdot 0,94 (50/50)} \times$ $\frac{6000}{49,7 \cdot 10^{-3} \sqrt{3}} = 357$
104	a_1	§ 9-4	1	1
105	$N'_{п1}$	(9-16)	$69,7 \cdot 1 (2 \cdot 3,5) = 9,96$	$357 \cdot 1 / (4 \cdot 3) = 29,9$
106	$N_{п1}$	§ 9-4	10	30
107	w_x	(9-17)	$10 \cdot 2 \cdot 3,5 \cdot 1 = 70$	$30 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 1 = 360$
108	N_d	§ 11-4	2	1
109	c_d	§ 11-4	6	2
110	a_d	§ 11-4	2	4
111	w_d	(11-38)	$2 \cdot 2 \cdot 3,5 \cdot 2 = 7$	$1 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4 = 3$
112	$\Phi, \text{ Вб}$	(9-18)	$17,6 \cdot 10^{-3} \cdot 69,7 \cdot 70 = 17,5 \cdot 10^{-3}$	$49,7 \cdot 10^{-3} \cdot 357 / 360 = 49,5 \cdot 10^{-3}$
113	$B_s, \text{ Тл}$	(9-19)	$0,77 \cdot 69,7 / 70 = 0,767$	$0,82 \cdot 357 / 360 = 0,813$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
114	I'_1, A	(11-39)	—	$\frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,9 \cdot 0,94} = 45,5$
115	I'_1, A	(11-40)	$\frac{30 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,8} = 54,1$	—
116	$A_1, A \cdot cm$	(9-21)	$10 \cdot 10 \cdot 42 \cdot 54,1 / (3,14 \times 286 \cdot 1) = 253$	$10 \cdot 30 \cdot 72 \cdot 45,5 / (3,14 \times 630 \cdot 1) = 497$
117	$B'_{c1}, Tл$	табл. 9-13	1,6	1,5

Обмотка статора с трапецидальными полужакрытыми пазами

118	$B'_{z1}, Tл$	табл. 9-14, § 11-4	$1,9 \cdot 0,95 = 1,8$	—
119	$t_1, мм$	(9-22)	$3,14 \cdot 286 / 42 = 21,4$	—
120	$b_{z1}, мм$	(9-23)	$21,4 \cdot 0,767 \cdot (0,97 \cdot 1,8) = 9,4$	—
121	$h_{c1}, мм$	(9-24)	$17,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 (2 \times 0,97 \cdot 160 \cdot 1,6) = 35,0$	—
122	$h_{ш1}, мм$	(9-25)	$[(406 - 286) / 2] - 35 = 25$	—
123	$\delta_1, мм$	(9-26)	$[3,14 (286 + 2 \cdot 25) / 42] - 9,4 = 15,7$	—
124	$h_{ш1}, мм$	§ 9-4	0,5	—
125	$b'_{ш1}, мм$	(9-34)	$0,3 \sqrt{225} = 4,5$	—
126	$b_2, мм$	и § 9-4 (9-27)	$\frac{3,14 (286 + 2 \cdot 0,5 - 4,5) - 42 \cdot 9,4}{(42 - 3,14)} = 12,7$	—
127	проверка b_1 и $b_2, мм$	(9-28)	$42 (15,7 - 12,7) + 3,14 (12,7 - 4,5) - 2 \times 3,14 (25 - 0,5) \approx 0$	—
128	$S_{ш1}, мм^2$	(9-29)	$\frac{15,7 + 12,7}{2} (25 - 0,5 - \frac{12,7 - 4,5}{2}) = 289$	—
129	b_c	§ 9-4	0,2	—
130	$h_c, мм$	§ 9-4	0,2	—
131	$S'_{ш1}, мм^2$	(9-30)	$(\frac{15,7 + 12,7}{2} - 0,2) \times (25 - 0,5 - \frac{12,7 - 4,5}{2} - 0,2) = 282$	—
132	$b_{ш}, мм$	§ 9-17	0,17	—
133	$S_{ш}, мм^2$	(9-31)	$0,4 (2 \cdot 25 + 15,7 + 12,7) = 31,4$	—

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
134	$S_{пр}, \text{мм}^2$	(11-41)	$0,5 \cdot 15,7 + 12,7 = 20,6$	—
135	$S''_{пн}, \text{мм}^2$	(9-33)	$282 - 31,4 - 20,6 = 230$	—
136	$S''_{по}, \text{мм}^2$	(11-42)	$0,85 \cdot 230 = 195,5$	—
137	c	§ 11-4	6	—
138	$k'_{п}$	§ 11-4	0,75	—
139	$d', \text{мм}$	(11-46)	$\sqrt{0,75 \cdot 195,5 \cdot (10 \cdot 6)} = 1,56$	—
140	$d/d', \text{мм/мм}$	Приложение I	1,40/1,485	—
141	$S_{с}, \text{мм}^2$	То же	1,539	—
142	$S_{с}, \text{мм}^2$	(11-43)	$1,539 \cdot 6 = 9,234$	—
143	$S''_{п.д.}, \text{мм}^2$	(11-44)	$0,15 \cdot 230 = 34,5$	—
144	$h_{п.д.}, \text{мм}$	(11-45)	$0,15 \cdot 25 = 3,75$	—
145	$c_{д.}$	§ 11-4	6	—
146	$d_{д.}/d'_{д.}, \text{мм}$	Приложение I	1,40/1,485	—
147	$S_{д.}, \text{мм}^2$	То же	1,539	—
148	$S_{эф.д.}, \text{мм}^2$	(11-47)	$1,539 \cdot 6 = 9,234$	—
149	$k_{п}$	(11-48)	$\frac{10 \cdot 6 \cdot 1,485^2 + 2 \cdot 6 \cdot 1,485^2}{230} = 0,69$	—
150	$l_{ср1}, \text{мм}$	(9-40)	$3,14 (286 + 25) \cdot 42 = 23,3$	—
151	$b_{ср1}, \text{мм}$	(9-41)	$23,3 \cdot 8 = 186,4$	—
152	$l_{д1}, \text{мм}$	(9-42)	$(1,16 + 0,14 \cdot 2) 186,4 + 15 = 284$	—
153	$l_{ср1}, \text{мм}$	(9-43)	$2 (160 + 284) = 890$	—
154	$l_{в1}, \text{мм}$	(9-45)	$(0,12 + 0,15 \cdot 2) 186,4 + 10 = 88$	—
155	$l_{ср.д.}, \text{мм}$	§ 11-4	890	—
156	$J_1, \text{А мм}^2$	(9-39)	$54,1 (6 \cdot 1,539 \cdot 1) = 5,86$	—
157	$A_1 J_1, \text{А}^2 (\text{см} \cdot \text{мм}^2)$	§ 11-4	$253 \cdot 5,86 = 1483$	—
158	$(A_1 J_1)_{доп.}, \text{А}^2 (\text{см} \cdot \text{мм}^2)$	Рис. 11-12	$2150 > 1483$	—

Обмотка статора с прямоугольными открытыми пазами

159	$B'_{элmax}, \text{Тл}$	Табл. 9-16	—	$1,9 \cdot 0,95 = 1,8$
160	$t_1, \text{мм}$	§ 11-4	—	$3,14 \cdot 630 \cdot 72 = 27,5$
161	$b'_{элmin}, \text{мм}$	(9-47)	—	$27,5 \cdot 0,817 / (0,95 \cdot 1,8) = 13,2$
162	$b'_{пн}, \text{мм}$	(9-48)	—	$27,5 - 13,2 = 14,3$
163	$h_{с1}, \text{мм}$	(9-24)	—	$\frac{49,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 0,95 \cdot 385 \cdot 1,5} = 45$
164	$h_{пн}, \text{мм}$	(9-25)	—	$\frac{850 - 630}{2} = 45 = 65$

Продолжение

Последовательность в расчете	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
165	h_n , мм	Приложение 30	—	14,2
166	$2b_n$, мм	То же	—	4,3
167	$h_{ш}$, мм	§ 9-4	—	1,0
168	h_k , мм	§ 9-4	—	3,5
169	$b_{з\text{min}}$, мм	§ 9-4	—	Принимаем 13
170	$b_{пл}$, мм	(9-48)	—	$27,5 - 13,0 = 14,5$
171	$b_{сг}$, мм	§ 9-4	—	0,35
172	$h_{сг}$, мм	§ 9-4	—	0,35
173	$N_{ш}$	§ 9-4	—	1
174	$b'_{эф}$, мм	(9-50)	—	$(14,5 - 4,1 - 0,35)/1 = 10$
175	N_B	(9-51)	—	$30/1 = 30$
176	$a'_{эф}$, мм	(11-49)	—	$(0,9 \cdot 65 - 12,4 - 3,5 - 1,0 - 0,35) \cdot 30 = 1,40$
177	$S'_{эф}$, мм ²	(9-53)	—	$1,40 \cdot 10 = 14$
178	c	§ 9-4	—	2
179	a' , мм	(9-54)	—	$(1,4/1) - 0,28 = 1,12$
180	b' , мм	(9-55)	—	$(10/1) - 0,22 = 9,78$
181	$\Delta_{н.в}/\Delta_{н.в}$, мм	Приложение 3	—	0,28, 0,22
182	a , мм	Приложение 2	—	1,12
183	b , мм	То же	—	4,75
184	S , мм ²	§ 11-4	—	5,1
185	$c_{о.в}$	§ 11-4	—	1
186	$c_{д.в}$	§ 11-4	—	2
187	$c_{о.ш}$	§ 11-4	—	2
188	$c_{д.ш}$	§ 11-4	—	2
189	$b_{пл}$, мм	(9-57)	—	$1 \cdot 2 (4,75 + 0,22) + 4,1 + 0,35 = 14,5$
190	$b_{з\text{min}}$, мм	(9-58)	—	$27,5 - 14,5 = 13,0$
191	$B_{з\text{max}}$, Тл	(9-59)	—	$27,5 \cdot 0,817 (13,0 \cdot 0,95) = 1,82$
192	$h_{п.о}$, мм	(11-50)	—	$30 \cdot 1 (1,12 + 0,30) + 12,4 = 55,0$
193	$h_{п.д}$, мм	Приложение 30	—	$0,5 + 1,1 + 0,2 = 1,8$
194	$h_{п.л}$, мм	(11-51)	—	$1 \cdot 2 (1,12 + 0,30) + 1,8 = 4,64$
195	$h_{ш}$, мм	(11-52)	—	$55,0 + 4,64 + 3,5 + 1,0 + 0,35 = 64,49$
196	$t_{срл}$, мм	(9-40)	—	$3,14 (630 + 65) / 72 = 30$
197	$b_{срл}$, мм	(9-41)	—	$30 \cdot 8 = 240$
198	$l_{пл}$, мм	(9-61)	—	$1,2 \cdot 240 + 65 + 90 = 443$
199	$l_{срл}$, мм	(9-43)	—	$2 (445 + 443) = 1776$
200	$l_{пл}$, мм	(9-63)	—	$0,35 \cdot 240 + 65/2 + 45 = 162$
201	$l_{ср.д}$, мм	§ 11-4	—	1776
202	J_1 , А·мм ²	(9-39)	—	$45,5 (2 \cdot 5,1 \cdot 1) = 4,45$
203	$A_1 J_1$	§ 11-4	—	$497,4 \cdot 4,45 = 2210$
204	A^2 (см·мм ²) ($A_1 J_1$) _{доп.} A^2 (см·мм ²)	рис. 11-12 § 9-4	—	$2240 > 2210$

§ 11-5. Демпферная (пусковая) обмотка

Демпферная обмотка полюсов синхронных машин выполняет ряд функций. В генераторах она служит для снижения уровня динамических перенапряжений в обмотке ротора при несимметричных коротких замыканиях, гашения обратного синхронного поля, улучшения формы ЭДС и симметрии напряжений при несимметричных нагрузках отдельных фаз, успокоения качаний и повышения динамической устойчивости работы. Генераторы малой мощности (до 100 кВт) обычно не имеют демпферной обмотки.

Синхронные двигатели выполняют с демпферной обмоткой, которая служит в качестве пусковой при асинхронном пуске, а также для успокоения качаний в процессе работы. Демпферную обмотку обычно изготавливают из стержней круглого сечения, закладываемых в круглые пазы, равномерно расположенные по дуге полюсных наконечников. Концы стержней замыкают пластинами (сегментами), расположенными вдоль полюсной дуги с обеих сторон полюса. Эти сегменты соединяют между собой по междуполюсному пространству пластинами, образуя короткозамыкающие кольца. Параметры демпферной обмотки устанавливают с учетом следующих условий. Для улучшения демпфирующего эффекта обмотка должна иметь малое активное сопротивление. Поэтому стержни, короткозамыкающие сегменты и соединительные пластины обычно выполняют из меди.

Суммарную площадь поперечного сечения стержней демпферной обмотки на один полюс целесообразно принимать близкой к 15% суммарной площади поперечного сечения меди обмотки статора, приходящейся на одно полюсное деление (мм²)

$$S_{2\Sigma} \approx 0,015 \tau A_1 / I_1. \quad (11-53)$$

Для уменьшения добавочных потерь и пульсаций ЭДС обмотки статора желательно принимать зубцовое деление полюсного наконечника ротора t_2 близким к зубцовому делению статора t_1 . При q_1 , равном целому числу, а также при $q_1 = b + c/d = b + 1/2$ или $bd + c \leq 9$ целесообразно выбирать $t_2 = (0,8 + 0,95) t_1$. При $bd + c > 9$ целесообразно принимать в генераторах $t_2 = t_1$, а в двигателях (чтобы исключить возможность проявления эффекта «прилипания») t_2 должно быть несколько меньше или больше t_1 . В приведенных выражениях $b = (1, 2, 3, 4 \dots)$; c/d — несократимая дробь.

Предварительное количество стержней демпферной обмотки на один полюс (шт.)

$$N'_2 = 1 + (b_{\text{пл}} - 20) / t'_2. \quad (11-54)$$

Количество стержней демпферной обмотки на полюс N_2 выбирают так, чтобы минимальная ширина крайнего зубца полюсного наконечника $b_{32 \text{ мин}}$ была не менее 3 мм и не превышала $0,5 t_2$.

Предварительный диаметр стержня демпферной обмотки (мм)

$$d'_c = 1,13 \sqrt{S_{2\Sigma} N'_2}; \quad (11-55)$$

принимают значение d'_c , равное ближайшему целому числу, и определяют соответствующее этому диаметру d_c сечение стержня S.

Уточненное значение зубцового деления полюсного наконечника (мм)

$$t_2 = (b_{н.п} - d_c - 2b_{з2 \min}) / (N_2 - 1). \quad (11-56)$$

Диаметр круглой части паза полюсного наконечника (мм)

$$d_{п2} = d_c + (0,1 \pm 0,15). \quad (11-57)$$

Размеры шлица паза демпферной обмотки генераторов выбирают так, чтобы ширина $b_{ш2}$ и высота $h_{ш2}$ (рис. 11-13) были примерно одинаковыми (около 3 мм); в двигателях (для увеличения вращающего момента) высоту шлица $h_{ш2}$ принимают 1,5–2 мм.

Для обеспечения механической прочности кромок полюсного наконечника должно соблюдаться условие $h'_{н.п} \geq 2d$. При малых высотах кромок полюсных наконечников крайние пазы демпферной обмотки выполняются закрытыми; при этом $h'_{н.п}/d_c \geq 1,7$.

Предварительная длина стержня демпферной обмотки

$$l'_{ст} = l_1 + 0,2 \tau, \quad (11-58)$$

затем ее уточняют при проработке конструкции машины.

Размеры короткозамыкающих сегментов выбирают такими, чтобы их высота $h_c \geq 2d_c$, толщина $l_c \geq 0,7d_c$, а площадь поперечного сечения S_c составляла около половины суммарной площади поперечного сечения стержней одного полюса (мм²), т. е.

$$S'_c = l_c h_c \approx 0,5 S_{2\sigma}. \quad (11-59)$$

Окончательно размеры сегмента в поперечном сечении $h_c \times l_c$, а также его площадь в этом сечении S_c следует выбрать по приложению 2.

Площадь поперечного сечения перемычки $S_{п}$ между сегментами разных полюсов принимают не менее $0,5 S_c$, а площадь контакта между перемычкой и сегментом — не менее $5 S_c$.

Примеры расчета машин 4. Демпферная (пусковая) обмотка

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
205	$S_{2\sigma}$, мм ²	(11-53)	—	$0,015 \cdot 247,3 \cdot 497,4,45 = 414$
206	t'_2 , мм	§11-5	—	27,5
207	N'_2 , шт.	(11-54)	—	$1 + \frac{173 - 20}{27,5} = 6,6 \approx 7$
208	d'_c , мм	(11-55)	—	$1,13 \sqrt{414/7} = 8,7$
209	d_c ; S_c , мм; мм ²	§11-5	—	10; 78,5
210	$h'_{н.п} d$	§11-5	—	$20,7/10 = 2,07 > 1,7$
211	$b_{з2 \min}$, мм	§11-5	—	8

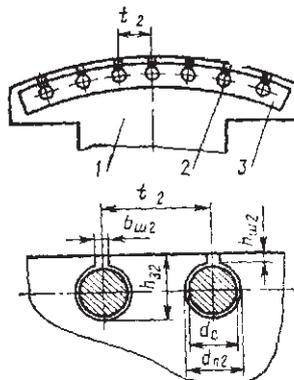


Рис. 11-13. Эскиз полюсного наконечника с пазами демпферной обмотки:

1 — полюс; 2 — стержень демпферной обмотки; 3 — короткозамыкающий сегмент

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
212	l_2 , мм	(11-56)	—	$(173-10-28)(7-1)=24,5$
213	$d_{ш2}$, мм	(11-57)	—	$10+0,1=10,1$
214	$b_{ш2} \times h_{ш2}$, мм	§ 11-5	—	3×2
215	$l'_{ст}$, мм	(11-58)	—	$445+0,2 \cdot 247,3=495$
216	$S'_{с}$, мм ²	(11-59)	—	$0,5 \cdot 414=207$
217	$h'_{с}$, мм	§ 11-5	—	$2 \cdot 10=20$
218	$l'_{с}$, мм	§ 11-5	—	$0,7 \cdot 10=7,0$
219	$h_{с} \times l_{с}$, мм	Приложение 2	—	20×10
220	$S_{с}$, мм ²	То же	—	199,1

§ 11-6. Расчет магнитной цепи при холостом ходе

Общие положения. Для построения характеристик намагничивания $\Phi=f(F_2)$ и х.х. $E=f(F_2)$ синхронной машины производят расчет магнитной цепи при х.х., который сводится к определению МДС обмотки возбуждения F_2 при нескольких значениях магнитного потока Φ и соответствующей ему ЭДС обмотки статора E . МДС F_2 равна сумме МДС отдельных последовательно соединенных участков магнитной цепи,

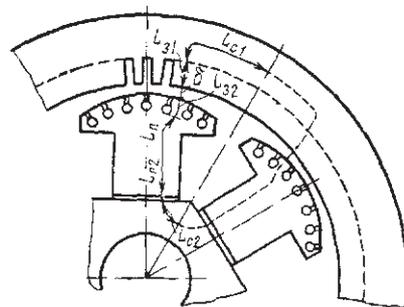


Рис. 11-14. Схема магнитной цепи синхронной машины

включающей воздушный зазор между полюсным наконечником ротора и сердечником статора, зубцы статора, спинки статора и ротора, сердечник полюса, полюсные наконечники и зазор в стыке полюса и сердечника ротора или полюсного наконечника и полюса.

Магнитное поле синхронной машины имеет сложную форму в связи с зубчатостью статора и полюсного наконечника (при наличии демпферной обмотки) и насыщением участков ярма и зубцов.

Влияние зубчатости зазора, вентиляционных каналов в сердечнике статора, насыщения зубцовой зоны и спинки статора при расчете синхронных машин, так же как и для асинхронных двигателей (см. § 9-7) и машин постоянного тока (см. § 10-8), учитывают системой коэффициентов и применением таблиц намагничивания $H=f(B)$ для зубцов и спинки статора (см. приложения 8—16).

Поскольку магнитная цепь синхронной машины (рис. 11-14) симметрична, то расчет МДС ведется на один полюс. При этом для каждого участка определяют площадь поперечного сечения,

магнитную индукцию (полагая, что она распределена равномерно по всему сечению рассматриваемого участка), напряженность поля, среднюю длину пути магнитного потока, МДС участка и суммарную МДС цепи.

При расчете магнитной цепи условно принимают среднюю длину пути магнитного потока на отдельных участках магнитопровода. В действительности длина этих путей в спинке статора и ротора различна по середине и по краям полюсного деления. Соответственно неравномерно распределяется магнитная индукция.

Для упрощения расчетов при определении магнитного напряжения спинки статора следует пользоваться кривыми намагничивания, построенными с учетом этого фактора и приведенными в приложениях 11—13. Магнитную цепь синхронных машин рассчитывают в такой последовательности.

МДС для воздушного зазора между сердечником статора и полюсным наконечником. МДС определяют по (9-116) — (9-121). При этом расчетная площадь поперечного сечения воздушного зазора (мм^2)

$$S_{\delta} = \alpha' \tau (l'_1 + 2\delta). \quad (11-60)$$

Уточненное значение магнитной индукции в воздушном зазоре (Тл)

$$B_{\delta} = \Phi \cdot 10^6 / S_{\delta}. \quad (11-61)$$

МДС для зубцов статора синхронных машин. МДС определяют так же, как и для асинхронных двигателей (см. § 9-7).

МДС для зубцов при трапецидальных полужакрытых пазах статора (см. рис. 9-7). МДС определяют по (9-124) — (9-125) и приложениям 8—10 (при $B_{z1} \leq 1,8$ Тл) или приложениям 14—16 (при $B_{z1} > 1,8$ Тл). При этом расчетная площадь поперечного сечения зубцов статора (мм^2)

$$S_{z1} = z_1 \alpha' l'_1 b_{z1} k_{c1} / (2p) \quad (11-62)$$

Магнитная индукция в равновеликом поперечном сечении зубца (Тл)

$$B_{z1} = \Phi \cdot 10^6 / S_{z1}. \quad (11-63)$$

МДС для зубцов при прямоугольных открытых и полужакрытых пазах статора МДС (см. рис. 9-9). МДС определяют по (9-122) — (9-126) и приложениям 8—10 (при $B_{z1} \leq 1,8$ Тл) или по (9-124) — (9-136) и приложениям 14—16 (при $B_{z1} > 1,8$ Тл).

Расчетная площадь поперечного сечения зубцов статора (мм^2)

$$S_{z1(1/3)} = z_1 \alpha' l'_1 b_{z1(1/3)} k_{c1} / (2p). \quad (11-64)$$

Магнитная индукция в зубце статора (Тл) на расстоянии $1/3$ его высоты от окружности, соответствующей диаметру D_1 ,

$$B_{z1(1/3)} = \Phi \cdot 10^6 / S_{z1(1/3)}. \quad (11-65)$$

МДС для спинки статора. Расчетная площадь поперечного сечения спинки статора (мм^2) и магнитная индукция (Тл)

$$S_{c1} = h_{c1} l_{c1} k_c. \quad (11-66)$$

$$B_{c1} = \Phi \cdot 10^6 / 2(S_{c1}). \quad (11-67)$$

Напряженность магнитного поля (А/см) определяют по кривым намагничивания для спинки статора (см. приложения 11—13), а среднюю длину пути магнитного потока (мм) L_{c1} — по (9-166).
МДС для спинки статора (А)

$$F_{c1} = 0,1 H_{c1} L_{c1}. \quad (11-68)$$

МДС для зубцов полюсного наконечника

Магнитная индукция в зубцах полюсного наконечника (Тл) $B_{z2} = t_2 B_0 / k_c (t_2 - 0,94 l_{t2}) \quad (11-69)$

Напряженность магнитного поля в зубцах полюсного наконечника (А/см) H_{z2} — из приложений 5—7, 21

Средняя длина пути магнитного потока в зубцах полюсного наконечника (мм) $L_{z2} = h_{m2} + d_{n2} \quad (11-70)$

МДС для зубцов полюсного наконечника (А) $F_{z2} = 0,1 H_{z2} L_{z2} \quad (11-71)$

МДС для полюсов. Магнитный поток в полюсном сердечнике Φ_n больше потока в воздушном зазоре Φ на величину потока рассеяния Φ_σ , оцениваемую коэффициентом рассеяния $\sigma = 1,05 \div 1,2$.

Если величина расчетной магнитной индукции в сердечнике полюса $B_n \leq 1,6$ Тл, то магнитный поток по высоте полюса изменяется незначительно, поэтому можно принять $B_n = \Phi_n / S_n$.

Активная площадь поперечного сечения полюсного сердечника S_n (мм²) определяется шириной b_n и длиной l_n полюса (рис. 11—11).

Для найденного значения B_n по приложениям 5, 6, 7, 20 или 21 определяют напряженность поля в сердечнике полюса H_n (А/см). Если $B_n > 1,6$ Тл, то следует учитывать изменение магнитного потока по высоте полюса, обусловленное рассеянием. В этом случае величину магнитного потока определяют в трех сечениях по высоте полюса — у его основания Φ_{n1} , у полюсного наконечника Φ_{n2} и в среднем сечении $\Phi_{n,ср}$.

По полученным значениям магнитных потоков и известной площади поперечного сечения сердечника полюса определяют индукции в рассматриваемых сечениях полюса B_{n1} , B_{n2} , $B_{n,ср}$ и по кривой намагничивания (см. приложение 21) находят соответствующие напряженности магнитного поля H_{n1} , H_{n2} , $H_{n,ср}$.

МДС для полюсов рассчитывают в такой последовательности.

Полюсные наконечники гребенчатой конструкции (см. рис. 11-6)

Величина выступа полюсного наконечника (мм) $b''_n = 0,5(b'_{n,n} - b_n) \quad (11-72)$

Высота широких полюсных наконечников (мм) $h_{ш} = h_{n,n} + \delta - b'_n / (4D_1) \quad (11-73)$

Расстояние между боковыми поверхностями широких пакетов смежных полюсных наконечников (мм) $a_m = \tau - b_n - (\pi h_m / p) \quad (11-74)$

Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния в зоне широких пакетов полюсных наконечников $\lambda_m = (0,5 \pi l_m h_m / a_m) + \frac{1}{2} [0,43 \pi l_m b''_n / (a_m + b''_n)] + \frac{1}{2} [0,43 \pi l_m b'_n / (a_m + 0,5 b'_n)] \quad (11-75)$

Высота узких (в том числе крайних) полюсных наконечников (мм)	$h_y = h_{нн} + \delta - [b^2_{п} / (4D_1)]$	(11-76)
Расстояние между боковыми поверхностями узких (в том числе крайних) пакетов смежных полюсных наконечников, мм	$a_y = \tau - b_{п} - \pi h_y / p$	(11-77)
Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния в зоне узких пакетов полюсных наконечников	$\lambda_y = 0,5\pi l_y h_y / a_y$	(11-78)
Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния в зоне крайних пакетов полюсных наконечников	$\lambda_{нр} = 2l_{нр} h_y / a_y$	(11-79)
Суммарный коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния полюсных наконечников гребенчатой конструкции	$\lambda_{нп} = \lambda_{н} + \lambda_y + \lambda_{нр}$	(11-80)
Длина пути магнитного потока в полюсе, при отсутствии демпферной обмотки (мм)	$L_{п} = h'_{п} + 0,7h_{нп}$	(11-81)
То же, при наличии демпферной обмотки	$L_{п} \approx h'_{п} + 0,7h_{нп} - h_{з2}$	(11-82)

Полюсные наконечники традиционной конструкции (см. рис. 11-8)

Высота полюсного наконечника (мм)	$h_{п} = (2h_{нп} + h'_{нп}) / 3$	(11-83)
Расстояние между боковыми поверхностями смежных полюсных наконечников (мм)	$a_{пп} \approx [\pi(D_1 - 2\delta'' - h'_{нп}) / 2p] - b'_{нп}$	(11-84)
Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния по внутренним поверхностям полюсных наконечников	$\lambda_{пп} = 140 \left(\frac{h_{пп}}{a_{пп}} - 0,25 \right) + 55 \left(\frac{b''_{пп}}{a_{пп}} + 0,2 \right) - 40 \left(\frac{b''_{пп}}{a_{пп}} - 0,5 \right)^2$	(11-85)
Длина пути магнитного потока в полюсе при отсутствии демпферной обмотки (мм)	$L_{п} = h'_{п} + 0,5h_{пп}$	(11-86)
То же, при наличии демпферной обмотки	$L_{п} = h'_{п} + 0,5h_{пп} - L_{з2}$	(11-87)
Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния по сердечникам полюсов	$\lambda_{п.с} = \frac{55h'_{п}}{\tau - b_{п} - (h'_{п} + 2h_{нп} + 2\delta)\pi / (2p)}$	(11-88)
То же, по торцам полюсов	$\lambda_{п.т} = 37b_{п} / l_{п}$	(11-89)
Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния полюсов	$\lambda_{п} = \lambda_{пп} + \lambda_{п.с} + \lambda_{п.т}$	(11-90)
МДС для статора и воздушного зазора (А)	$F_{\delta\sigma c} = F_{\delta} + F_{\delta 1} + F_{c1}$	(11-91)
Магнитный поток рассеяния полюсов (Вб)	$\Phi_{\sigma} = 4l_{п} l_{п} \Gamma_{\delta\sigma c} \cdot 10^{-11}$	(11-92)
Коэффициент рассеяния магнитного потока	$\sigma = 1 + (\Phi_{\sigma} / \Phi)$	(11-93)
Расчетная площадь поперечного сечения сердечника полюса (мм ²)	$S_{п} = k_c l_{п} b_{п}$	(11-94)

При $B_n < 1,6$ Тл

Магнитный поток в сердечнике полюса (Вб) $\Phi_n = \Phi + \Phi_o = \sigma\Phi$ (11-95)

Магнитная индукция в сердечнике полюса (Тл) $B_n = \Phi_n / (S_n \cdot 10^{-6})$ (11-96)

Напряженность магнитного поля в сердечнике полюса (А/см) H_n — по приложениям 5—7, 21

При $B_n > 1,6$ Тл

Магнитный поток у основания полюса (Вб) $\Phi_{n1} = \Phi + \Phi_o^-$ (11-97)

То же, у полюсного наконечника $\Phi_{n2} = \Phi + (\lambda_{н.п} / \lambda_{п}) \Phi_o$ (11-98)

То же, в среднем сечении полюса $\Phi_{п.ср} = 0,5(\Phi_{n1} + \Phi_{n2})$ (11-99)

Магнитная индукция у основания полюса (Тл) $B_{n1} = \Phi_{n1} / (S_n \cdot 10^{-6})$ (11-100)

То же, у полюсного наконечника $B_{n2} = \Phi_{n2} / (S_n \cdot 10^{-6})$ (11-101)

То же, в среднем сечении полюса $B_{п.ср} = \Phi_{п.ср} / (S_n \cdot 10^{-6})$ (11-102)

Напряженность магнитного поля у основания полюса, у полюсного наконечника и в среднем сечении полюса (А/см) H_{n1} , H_{n2} и $H_{п.ср}$ по приложениям 5—7, 21

Расчетная напряженность магнитного поля в сердечнике полюса (А/см) $H_n = (H_{n1} + 4H_{п.ср} + H_{n2}) / 5$ (11-103)

МДС для полюса (А) $F_n = 0,1 L_n H_n$ (11-104)

МДС для спинки ротора

Расчетная площадь поперечного сечения спинки ротора (мм²) $S_{c2} = l_2 h'_{c2} k_c$ (11-105)

Среднее значение индукции в спинке ротора (Тл) $B_{c2} = \sigma\Phi \cdot 10^6 / (2S_{c2})$ (11-106)

Напряженность магнитного поля в спинке ротора (А/см) H_{c2} — из приложений 5—7, 21

Средняя длина пути магнитного потока в спинке ротора (мм) $l_{c2} = [\pi(D_2 + 2h_{c2}) / (4p)] + 0,5h'_{c2}$ (11-107)

МДС для спинки ротора (А) F_{c2} по (9-170)

МДС для воздушного зазора в стыке между сердечником полюса и полюсным наконечником (при гребенчатой конструкции ротора) или между сердечниками полюса и ротора (при традиционной конструкции ротора)

Зазор в стыке (мм) $\delta_{п2} = 2l_n \cdot 10^{-4} + 0,1$ (11-108)

МДС для зазора в стыке между сердечником полюса и полюсным наконечником (А) $F_{п2} = 0,8\delta_{п2} B_n^2 (n_m l_m / l_n) \cdot 10^3$ (11-109)

МДС для зазора в стыке между сердечниками полюса и ротора (А) $F_{r2} = 0,8\delta_{r2} B_n \cdot 10^3$ (11-110)

Параметры магнитной цепи

Суммарная МДС магнитной цепи (на один полюс) (А) $F_{\Sigma}^n = F_{\Sigma\sigma} + F_n + F_{c2} + F_{п2} + F_{r2}$ (11-111)

Коэффициент насыщения магнитной цепи $k_{нас} = F_{\Sigma} / (F_{\delta} + F_{п2})$ (11-112)

Характеристики намагничивания и холостого хода. Расчет характеристик намагничивания $\Phi = f(F_2)$ и х. х. $E = f(F_2)$ может быть выполнен в физических или относительных единицах. Обыч-

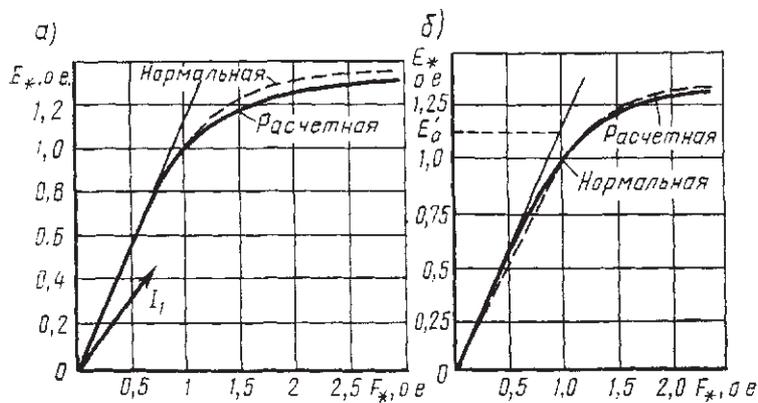


Рис. 11-15. Характеристики холостого хода к примерам расчета:
а — генератора, б — двигателя

но расчет ведется в относительных единицах для нескольких значений магнитного потока в воздушном зазоре Φ_* или ЭДС E_* в пределах от 0,5 до 1,3 о. е. При этом в качестве базового значения магнитного потока принимают его величину $\Phi_{(1)}$ при номинальном фазном напряжении, а базовое значение МДС соответствует МДС обмотки возбуждения $F_{\Sigma(1)}$ при х. х. и номинальном фазном напряжении U_1 . В таком случае обе характеристики выражаются одной и той же кривой.

Характеристики х. х. рассчитывают по приведенной методике, а результаты оформляют в виде табл. 11-2 и 11-3, полагая, что магнитный поток в воздушном зазоре (В6)

$$\Phi = \Phi_* \Phi_{(1)}. \quad (11-113)$$

ЭДС обмотки статора (В)

$$E = E_* U_1. \quad (11-114)$$

Магнитная индукция в воздушном зазоре (Тл)

$$B_\delta = \Phi_* B_{\delta(1)}. \quad (11-115)$$

Суммарная МДС для спинки ротора (А)

$$F_{c2} \approx F_{c2(1)} E_*. \quad (11-116)$$

Суммарная МДС для полюса и спинки ротора (А)

$$F_{\text{пс}} = F_{\text{п}} + F_{c2} + F_{\text{п}2} + F_{\text{з}2}. \quad (11-117)$$

Расчетную характеристику х. х. рекомендуется сравнить с нормальной, которую строят по следующим данным:

$E_* = E/U_1$	0	0,5	1,0	1,1	1,2	1,3
$F_* = F_{\Sigma}/F_{\Sigma(1)}$	0	0,47	1,0	1,17	1,4	2,0

Расхождение расчетной и нормальной характеристик в рабочей зоне не должно превышать 15%.

Примеры расчета машин
5. Расчет магнитной цепи

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
<i>При $\Phi_p = 1,0$</i>				
Воздушный зазор				
221	$[S_{\delta}, \text{мм}^2]$	(11-60)	$0,66 \cdot 224,5 (160 + 2 \cdot 1) =$ $= 24\,000$	$0,66 \cdot 247,3 (385 + 2 \cdot 2,5) =$ $= 63\,700$
222	$B_{\delta}, \text{Тл}$	(11-61)	$17,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 / 24\,000 =$ $= 0,73$	$49,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 / 63\,700 =$ $= 0,78$
223	$k_{\delta 1}$	(9-116)	$1 + \frac{4,5}{21,4 - 4,5 + 5 \cdot 1} \times$ $\times 21,4 / 4,5 =$ $= 1,16$	$1 + \frac{14,5}{27,5 - 14,5 + 5} \times$ $\times 2,5 \cdot 27,5 / 14,5 =$ $= 1,389$
224	$k_{\delta 2}$	(9-117)	—	$1 + \frac{3}{24,5 - 3 + 5} \times$ $\times 2,5 \cdot 24,5 / 3 = 1,024$
225	k_k	(9-118)	—	$1 - \frac{3 \cdot 2,5}{55 + 3 \cdot 2,5} \times$ $\times (1 + 55/10) = 0,927$
226	k_b	(9-120)	1,16	$1,389 \cdot 1,024 \cdot 0,927 = 1,32$
227	$F_{\delta}, \text{А}$	(9-121)	$0,8 \cdot 1 \cdot 1,16 \cdot 0,73 \cdot 10^3 = 679$	$0,8 \cdot 2,5 \cdot 1,32 \cdot 0,78 \cdot 10^3 =$ $= 2060$
Зубцы статора				
228	$S_{31}, \text{мм}^2$	(11-62)	$42 \cdot 0,66 \cdot 160 \cdot 9,4 \times$ $\times 0,97 / (2 \cdot 2) = 10,11 \cdot 10^3$	—
229	$t_1 (1/3), \text{мм}$	(9-122)	—	$3,14 (630 + 2 \cdot 65 \cdot 3) / 72 =$ $= 29,5$
230	$b_{31} (1/3), \text{мм}$	(9-126)	—	$29,5 - 14,5 = 15,0$
231	$S_{31} (1/3), \text{мм}^2$	(11-64)	—	$72 \cdot 0,66 \cdot 385 \cdot 15,0 \times$ $\times 0,95 / (2 \cdot 4) = 32,58 \cdot 10^3$
232	$B_{31}, \text{Тл}$	(11-63)	$17,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 / (10,11 \times$ $\times 10^3) = 1,74$	—
233	$B_{31} (1/3), \text{Тл}$	(11-65)	—	$49,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 (32,58 \times$ $\times 10^3) = 1,52$
234	$H_{31}, \text{А/см}$	приложение 9	—	$11,7$
235	$H_{31}, \text{А/см}$	приложение 8	12,9	—
236	$L_{31}, \text{мм}$	(9-124)	25,0	65,0
237	$F_{31}, \text{А}$	(9-125)	$0,1 \cdot 12,9 \cdot 25,0 = 32$	$0,1 \cdot 11,7 \cdot 65,0 = 76$
Спинка статора				
238	$S_{c1}, \text{мм}^2$	(11-66)	$35,0 \cdot 160 \cdot 0,97 = 5430$	$45 \cdot 385 \cdot 0,95 = 16460$
239	$B_{c1}, \text{Тл}$	(11-67)	$\frac{17,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 5430} = 1,61$	$\frac{49,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 16460} = 1,50$
240	$H_{c1}, \text{А/см}$	приложение 11	7,88	—
241	$H_{c1}, \text{А/см}$	приложение 12	—	9,05

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель	
242	$L_{с1}$, мм	(9-166)	$3,14 (406-35)/(4 \cdot 2)=146$	$3,14 (850-45)/(4 \cdot 4)=158$	
243	$F_{с1}$, А	(11-68)	$0,1 \cdot 7,88 \cdot 146=37$	$0,1 \cdot 9,05 \cdot 158=49$	
Зубцы полюсного наконечника					
244	$B_{з2}$, Тл	(11-69)	—	$24,5 \cdot 0,078/[0,98 (24,5 - 0,94 \cdot 10)]=1,29$	
245	$H_{з2}$, А см	приложение 21	—	13,4	
246	$L_{з2}$, мм		(11-70)	—	$2+10=12$
247	$F_{з2}$, А		(11-71)	—	$0,1 \cdot 13,4 \cdot 12=15$
Полюсы					
248	$b''_{п}$, мм	(11-72)	$0,5 (162-78)=42$	$0,5 (170-85)=42,5$	
249	$h_{ш}$, мм	(11-73)	$28+1-162^2/(4 \cdot 286)=6,1$	—	
250	$a_{ш}$, мм	(11-74)	$224,5-173-(3,14 \times \times 6,1/2)=42$	—	
251	$\lambda_{ш}$	(11-75)	$(0,5 \cdot 5 \cdot 24 \cdot 6,1/42) + [0,43 \cdot 5 \cdot 24 \cdot 42/(42 + 42)] + [0,43 \cdot 28 \times \times 162/(42+0,5 \cdot 162)]=50$	—	
252	h_y , мм	(11-76)	$28+1-[78^2/(4 \cdot 286)]=23,6$	—	
253	a_y , мм	(11-77)	$224,5-78-3,14 \times \times 23,4/2=109,8$	—	
254	λ_y	(11-78)	$0,5 \cdot 4 \cdot 8 \cdot 23,6/109,8=3,44$	—	
255	$\lambda_{кр}$	(11-79)	$2 \cdot 9 \cdot 23,4/107,8=3,9$	—	
256	$\lambda_{нп}$	(11-80)	$50+3,4+3,9=57,3$	—	
257	$L_{п}$, мм	(11-81)	$63+0,7 \cdot 28=82,6$	—	
258	$h_{н}$, мм	(11-83)	—	$(2 \cdot 30+17)/3=25,6$	
259	$a_{н.п}$, мм	(11-84)	—	$[3,14 (630-2 \cdot 3,3 - 17)/(2 \cdot 4)]-170=68$	
260	$\lambda_{н.п}$	(11-85)	—	$140 \left(\frac{25,6}{68} - 0,25 \right) + 5,5 \left(\frac{42,5}{68} + 0,2 \right) - 40 \left(\frac{42,5}{68} - 0,5 \right)^2 = 62,4$	
261	$L_{л}$, мм	(11-87)	—	$103+0,5 \cdot 30-12=106$	
262	$\lambda_{л.с}$	(11-88)	$\frac{55 \cdot 63}{224,5-77-[(63+2 \times \times 28+2 \cdot 1) \cdot \pi/4]} = 66$	$\frac{55 \cdot 103}{247,3-85-[(103+2 \times \times 30+2 \cdot 2,5) \cdot 3,14/8]} = 62,9$	
263	$\lambda_{н.в}$	(11-89)	$37 \cdot 77/170=16,8$	$37 \cdot 95/460=6,8$	
264	$\lambda_{п}$	(11-90)	$57,3+66,0+16,8=140,1$	$62,4+62,9+6,8=132,1$	
265	$F_{дас}$, А	(11-91)	$679+32+37=748$	$2060+76+49=2185$	
266	Φ_{σ} , Вб	(11-92)	$4 \cdot 150 \cdot 170 \cdot 748 \cdot 10^{-11} = 0,763 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 132,1 \cdot 460 \cdot 2185 \cdot 10^{-11} = 5,58 \cdot 10^{-3}$	

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
267	σ	(11-93)	$1 + [0,763 \cdot 10^{-3} / (17,55 \times 10^{-3})] = 1,043$	$1 + [5,58 \cdot 10^{-3} / (49,5 \times 10^{-3})] = 1,11$
268	S_{II} , мм ²	(11-94)	$0,97 \cdot 170 \cdot 78 = 13,2 \cdot 10^3$	$0,98 \cdot 460 \cdot 85 = 38,32 \cdot 10^3$
269	Φ_{II}	(11-95)	$17,55 \cdot 10^{-3} + 0,763 \times 10^{-3} = 18,31 \cdot 10^{-3}$	$49,5 \cdot 10^{-3} + 5,58 \cdot 10^{-3} = 55,08 \cdot 10^{-3}$
270	B_{II} , Тл	(11-96)	$18,31 \cdot 10^{-3} / (13,2 \cdot 10^3 \times 10^{-6}) = 1,42$	$55,08 \cdot 10^{-3} / (38,32 \cdot 10^3 \times 10^{-6}) = 1,44$
271	H_{II} , А/см	приложение 5	3,5	—
272	H_{II} , А/см	приложение 21	—	23,7
273	L_{II} , мм	(11-81)	$63 + 0,7 \cdot 28 = 84,6$	—
274	L_{II} , мм	(11-87)	—	$103 + 0,5 \cdot 30 = 12 = 106$
275	F_{II} , А	(11-104)	$0,1 \cdot 84,6 \cdot 3,5 = 30$	$0,1 \cdot 106 \cdot 23,7 = 251$

Спинка ротора

276	$S_{с2}$, мм ²	(11-105)	$170 \cdot 49 \cdot 0,97 = 8080$	$460 \cdot 180 \cdot 0,98 = 81150$
277	$B_{с2}$, Тл	(11-106)	$1,043 \cdot 17,5 \cdot 10^{-3} \times 10^3 / (2 \cdot 8080) = 1,13$	$1,11 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3} \times 10^3 / (2 \cdot 81150) = 0,34$
278	$H_{с2}$, А/см	приложение 5	1,28	—
279	$H_{с2}$, А/см	приложение 21	—	2,64
280	$L_{с2}$, мм	(11-107)	$\frac{3,14(72+2 \cdot 13)}{4 \cdot 2} + 0,5 \times 49 = 63$	$\frac{3,14(184+288)}{4 \cdot 4} + 0,5 \times 180 = 223$
281	$F_{с2}$, А	(9-170)	$0,1 \cdot 63 \cdot 1,28 = 8$	$0,1 \cdot 223 \cdot 2,64 = 60$

Воздушный зазор в стыке полюса

282	$\delta_{п2}$, мм	(11-108)	$2 \cdot 170 \cdot 10^{-4} + 0,1 = 0,13$	$2 \cdot 460 \cdot 10^{-4} + 0,1 = 0,19$
283	$F_{п2}$, А	(11-109)	$0,8 \cdot 0,13 \cdot 1,42 \cdot \frac{5 \cdot 24}{170} \times 10^3 = 104$	—
284	$F_{п2}$, А	(11-110)	—	$0,8 \cdot 0,19 \cdot 1,44 \cdot 10^3 = 220$
285	$F_{пс}$, А	(11-117)	$30 + 8 + 104 = 142$	$251 + 60 + 220 + 15 = 546$

Общие параметры магнитной цепи

286	$F_{\Sigma(I)}$, А	(11-111)	$748 + 142 = 890$	$2185 + 546 = 2731$
287	$k_{нас}$	(11-112)	$890 / (679 + 104) = 1,14$	$2731 / (2060 + 220) = 1,19$

Таблица 11-2

Наименование участка	Средняя длина пути магнитного потока, мм	Площадь поперечного сечения участка, мм ²	0,5		1,0		1,1		1,2		1,3						
			Φ, В6		17,55·10 ⁻³		19,30·10 ⁻³		21,06·10 ⁻³		22,82·10 ⁻³						
			E, В		231		284,1		277		300						
Коэффициенты	H, А/см		F, А		H, А/см		F, А		H, А/см		F, А						
	В, Тл	А/см	В, Тл	А/см	В, Тл	А/см	В, Тл	А/см	В, Тл	А/см	В, Тл	А/см					
Зазор между сердечником статора и полюсным наконечником	1,0	2 400	k _δ = 1,16	0,365	340	0,73	—	679	0,803	—	747	0,876	—	815	0,949	—	883
Зубцы статора	25,0	1 110	k _c = 0,97	0,868	2,76	7	1,74	12,9	32	1,91	23,5	59	2,08	45	113	2,25	115
Слинка статора	146,0	5 430	k _c = 0,97	0,907	1,25	12	1,61	7,88	37	1,77	17	1,94	44,9	67	164	2,10	100
Сердечник полюса	84,6	13 200	k _c = 0,97	0,71	0,79	7	1,42	3,5	30	1,56	12,4	107	1,65	27	232	1,81	80
Зазор в стыке полюса и полюсного наконечника	0,13			0,71	—	52	1,42	—	104	1,56	—	115	1,72	—	126	1,89	—
Слинка ротора	63	8 080	k _c = 0,97	0,58	0,67	4	1,13	1,28	8	1,25	1,7	11	1,37	2,7	17	1,51	6,7
				340 + 7 + 12 = 359		679 + 32 + 37 = 748		747 + 59 + 67 = 873		815 + 113 + 164 = 1092		883 + 288 + 336 = 1507					
				359 / 890 = 0,40		0,84		0,98		1,227		1,69					
				0,366 · 10 ⁻³		0,763 · 10 ⁻³		0,890 · 10 ⁻³		1,114 · 10 ⁻³		1,537 · 10 ⁻³					
				0,366 · 3 / 17,55 × 10 ⁻³ = 0,02		0,044		0,051		0,063		0,087					
				8,775 · 10 ⁻³ + 0,366 · 10 ⁻³ = 9,14 · 10 ⁻³		18,31 · 10 ⁻³		20,19 · 10 ⁻³		22,17 · 10 ⁻³		24,39 · 10 ⁻³					
				0,52		1,043		1,15		1,26		1,39					
				—		—		—		—		—					
				9,14 · 10 ⁻³		18,31 · 10 ⁻³		20,19 · 10 ⁻³		21,49 · 10 ⁻³		23,42 · 10 ⁻³					
				0,52		1,043		1,15		1,24		1,36					
				7 + 4 + 52 = 63		30 + 8 + 104 = 142		107 + 11 + 115 = 233		232 + 17 + 126 = 375		688 + 42 + 138 = 868					
				0,07		0,16		0,26		0,42		0,98					
				359 + 63 = 422		748 + 142 = 890		873 + 233 = 1106		1092 + 375 = 1467		1507 + 868 = 2375					
				0,47		1,0		1,24		1,65		2,67					

Таблица П-3

Наименование участка	Ф, Е о е		1,0		1,1		1,2		1,3				
	Ф, Вб	Е, В	В, Тл	H, А/см	В, Тл	H, А/см	В, Тл	H, А/см	В, Тл	H, А/см			
Зазор между сердечником статора и полуслюком	2,5	63 700	0,39	1025	0,78	—	0,855	—	0,932	—	1,01	—	2666
Зубцы статора	65	32 580	0,95	18	1,52	11,7	1,67	17,5	1,82	29,2	1,975	60	390
Спинка статора	158	16 460	0,75	23	1,50	9,05	1,65	16,5	1,80	27	1,95	53,3	202
Зубцы полюсного конечника	12	—	0,98	6	1,22	13,4	1,33	17,2	1,45	24,4	1,57	37,0	41
Сердечник полюса	111	38 320	0,98	65	1,44	23,7	1,58	38,3	1,68	58,6	1,83	143	1572
Зазор в стыке полюса и сердечника ротора	0,19	38 320	0,695	109	1,44	—	1,58	—	1,68	—	1,83	—	275
Спинка ротора	223	81 150	0,98	30	0,33	2,64	0,37	2,96	0,40	3,20	0,45	3,60	83
$F_{\delta ac} = F_{\delta} + F_{\delta 1} + F_{\delta 11}$				1025 + 18 + 23 = 1066		2060 + 76 + 49 = 2185		2257 + 114 + 78 = 2449		2460 + 190 + 111 = 2761		2666 + 390 + 202 = 3258	
$F_{\delta ac} = F_{\delta ac} / F_{\delta} (1) \text{ о. е.}$				0,39		0,80		0,90		1,02		1,20	
$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\sigma} / \Phi_{(1)} \text{ о. е.}$				2,72 · 10 ⁻³		5,58 · 10 ⁻³		6,26 · 10 ⁻³		7,06 · 10 ⁻³		8,33 · 10 ⁻³	
$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\sigma} / \Phi_{(1)} \text{ о. е.}$				0,055		0,113		0,127		0,142		0,168	
$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\sigma} / \Phi_{(1)} \text{ о. е.}$				24,75 · 10 ⁻³ + 2,72 · 10 ⁻³ × 10 ⁻³ = 27,47 · 10 ⁻³		49,5 · 10 ⁻³ + 5,58 · 10 ⁻³ × 10 ⁻³ = 55,08 · 10 ⁻³		54,45 · 10 ⁻³ + 6,26 · 10 ⁻³ × 10 ⁻³ = 60,71 · 10 ⁻³		59,4 · 10 ⁻³ + 7,06 · 10 ⁻³ × 10 ⁻³ = 66,46 · 10 ⁻³		64,35 · 10 ⁻³ + 8,33 · 10 ⁻³ × 10 ⁻³ = 72,68 · 10 ⁻³	
$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\sigma} / \Phi_{(1)} \text{ о. е.}$				0,555		1,113		1,226		1,342		1,467	
$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\sigma} / \Phi_{(1)} \text{ о. е.}$				—		—		—		—		—	
$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\sigma} / \Phi_{(1)} \text{ о. е.}$				27,47 · 10 ⁻³		55,11 · 10 ⁻³		60,71 · 10 ⁻³		62,61 · 10 ⁻³		68,14 · 10 ⁻³	
$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\sigma} / \Phi_{(1)} \text{ о. е.}$				0,55		1,11		1,22		1,30		1,42	
$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\sigma} / \Phi_{(1)} \text{ о. е.}$				65 + 30 + 109 + 6 = 210		251 + 60 + 220 + 15 = 546		429 + 67 + 230 + 19 = 745		650 + 74 + 251 + 27 = 1002		1572 + 83 + 275 + 41 = 1971	
$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\sigma} / \Phi_{(1)} \text{ о. е.}$				0,07		0,19		0,26		0,33		0,69	
$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\sigma} / \Phi_{(1)} \text{ о. е.}$				1066 + 20 = 1276		2185 + 546 = 2731		2449 + 745 = 3194		2761 + 1002 = 3763		3258 + 1971 = 5229	
$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\sigma} / \Phi_{(1)} \text{ о. е.}$				0,47		1,0		1,16		1,37		1,91	

Аналогичным образом выполнены расчеты магнитной цепи при других значениях магнитного потока; в частности, при $\Phi=1,2; 1,3$ о. е. В рассматриваемых примерах магнитная индукция в сердечнике полюса превышает 1,6 Тл, в связи с этим расчет МДС произведен с учетом изменения величины магнитного потока, по высоте полюса согласно (11-97) — (11-103). Результаты расчетов сведены в табл. 11-2 и 11-3, по которым построены характеристики х. х., приведенные на рис. 11-15.

§ 11-7. Активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки статора

Определение активных и индуктивных сопротивлений обмотки статора необходимо для расчета режима х. х., номинальных параметров и рабочих характеристик синхронной машины.

Активное сопротивление обмотки статора рассчитывают для температуры 20 °С; при определении рабочих характеристик его приводят к стандартной рабочей температуре, соответствующей классу нагревостойкости применяемой изоляции путем умножения на коэффициент m_T (см. § 4-1).

При расчете индуктивных сопротивлений обмотки статора поле рассеяния (как в асинхронных машинах, § 9-8) условно разбивают на составляющие: пазовое, дифференциальное и лобовых частей обмоток. Для каждой составляющей определяют магнитную проводимость, суммируют эти проводимости и по ним рассчитывают индуктивное сопротивление обмотки.

При этом необходимо иметь в виду, что коэффициент проводимости дифференциального рассеяния λ_d , связанный с высшими гармоническими поля статора, для явнополюсных синхронных машин обычно меньше, чем для асинхронных, в связи с большим воздушным зазором. Влияние формы воздушного зазора на λ_d учитывают поправочным коэффициентом C_d . При равномерном зазоре $C_d=1$; при эксцентричном — $C_d=0,85 \div 0,95$ (меньшее значение принимают при $\delta''/\delta' = 1,5$ и $\alpha > 0,7$).

$$\lambda_{d1} = 0,03 \tau \dot{\alpha}' C_d / (\delta k_s q_1). \quad (11-118)$$

Коэффициент дифференциального рассеяния обмотки статора k_{d1} определяют по табл. 9-23. При нахождении коэффициента k_{p1} по табл. 9-22 под z_2 следует понимать число пазов (стержней) демпферной обмотки, приходящееся на один полюс. При отсутствии демпферной обмотки полагают $k_{p1}=1$.

При определении индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора синхронной машины следует учитывать также рас-

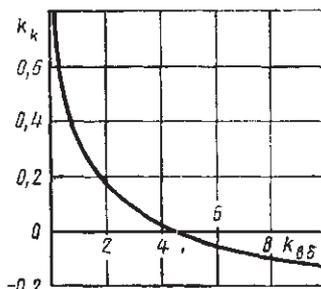


Рис. 11-16. Зависимость $k_k = f(k_{05})$

Примеры расчета машин

6. Активное и индуктивное сопротивление обмотки статора для установившегося режима

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
288	r_1 , Ом	(9-178)	$70 \cdot 890 / (57 \cdot 1 \cdot 6 \cdot 1,539 \cdot 10^3) = 0,118$	$360 \cdot 1776 / (57 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 5,1 \cdot 10^3) = 1,099$
289	r_{1*} , о. е.	(9-179)	$0,118 \cdot 54,1 \sqrt{3} / 400 = 0,0276$	$1,099 \cdot 45,5 \sqrt{3} / 6000 = 0,0144$
290	Проверка r_{1*} , о. е.	(9-180)	$\frac{3,14 \cdot 286 \cdot 253 \cdot 5,86}{114 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 400} \times \frac{890 \sqrt{3}}{54,1} = 0,0276$	$\frac{3,14 \cdot 630 \cdot 497 \cdot 4,45}{114 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 6000} \times \frac{1776 \sqrt{3}}{45,5} = 0,0144$
291	r_d , Ом	(9-178)	$7 \cdot 890 (57 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 1,539 \cdot 10^3) = 0,006$	$3 \cdot 1776 (57 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 5,1 \cdot 10^3) = 0,0023$
292	Размеры паза, мм	рис. 9-7 и 9-9, табл. 9-21	$b_{ш1}=4,4; b_2=12,7; h_{к1}=3; h_{ш1}=0,5; h_{ш1}=25,0; h_2=0,06; h_1=17,8$	$b_{ш1}=14,5; h_{ш1}=1; h_{к1}=3,5; h_2=2,55; h_{ш1}=65; h_3=5; h_1=47,6$
293	$k_{\beta 1}$	(9-181)	$0,4 + 0,6 \cdot 0,762 = 0,86$	$0,4 + 0,6 \cdot 0,89 = 0,93$
294	$k'_{\beta 1}$	(9-182)	$0,2 + 0,8 \cdot 0,762 = 0,81$	$0,2 + 0,8 \cdot 0,89 = 0,91$
295	$\lambda_{ш1}$	(9-185)	$\frac{17,8 \cdot 0,86}{3 \cdot 12,7} + \left(\frac{3 \cdot 3}{12,7 + 2 \cdot 4,4} + \frac{0,5}{4,4} + \frac{0,6}{12,7} \right) 0,81 = 1,154$	—
296	$\lambda_{ш1}$	(9-187)	—	$\frac{5}{4 \cdot 14,5} + \frac{47,6 - 5}{3 \cdot 14,5} \times \left(0,93 + \frac{3,5 + 1 + 2,55}{14,5} \right) 0,91 = 1,92$
297	$\lambda_{д1}$	(11-118)	$0,03 \frac{224,5 \cdot 0,66 \cdot 1}{1 \cdot 1,16 \cdot 3,5} = 1,092$	$0,03 \frac{247,3 \cdot 0,66 \cdot 0,95}{2,5 \cdot 1,32 \cdot 3} = 0,47$
298	$\lambda_{д2}$	(9-191)	$0,34 \frac{3,5}{160} (284 - 0,64) \times 0,762 \cdot 224,5 = 1,3$	$0,34 \frac{3}{445} (443 - 0,64) \times 0,89 \cdot 247,3 = 0,69$
299	$k_{\beta 2}$	(11-120)	$4,5 / (1 \cdot 1,16) = 3,78$	$14,5 / (2,5 \cdot 1,32) = 4,39$
300	k_{κ}	рис. 11-16	$\frac{0,02}{0,04 + 0,02 + 0,07} \times$	$\frac{0,01}{0,04 + 0,01 + 0,07} \times$
301	λ_{κ}	(11-119)	$\times \sqrt{(21,4 - 4,4) / 4,4} = 0,2$	$\times \sqrt{(27,5 - 14,3) / 14,3} = 0,11$
302	λ_1	(11-121)	$1,154 + 1,092 + 1,3 + 0,2 = 3,8$	$1,92 + 0,47 + 0,69 + 0,11 = 3,17$
303	x_{σ} , Ом	(9-193)	$\frac{1,58 \cdot 50 \cdot 160 \cdot 70^2}{2 \cdot 3,5 \cdot 10^3} \cdot 3,8 = 0,336$	$\frac{1,58 \cdot 50 \cdot 445 \cdot 360^2}{4 \cdot 3 \cdot 10^3} \cdot 3,17 = 12,05$
304	$x_{\sigma*}$, о. е.	(9-194)	$0,336 \cdot 54,1 \cdot \sqrt{3} / 400 = 0,0787$	$12,05 \cdot 45,5 \cdot \sqrt{3} / 6000 = 0,159$
305	Проверка $x_{\sigma*}$, о. е.	(9-195)	$\frac{0,39 (286 \cdot 253)^2 \cdot 160 \cdot 3,8}{\sqrt{3 \cdot 400 \cdot 54,1 \cdot 1 \cdot 42 \cdot 10^7}} = 0,0788$	$\frac{0,39 (630 \cdot 497)^2 \cdot 445 \cdot 3,17}{\sqrt{3 \cdot 6000 \cdot 45,5 \cdot 72 \cdot 10^7}} = 0,159$

сеяние между коронками зубцов, коэффициент проводимости которого

$$\lambda_k = 0,04 + k_k + 0,07 \sqrt{(t_1 - b_{ш1})/b_{ш1}} \quad (11-119)$$

Здесь $b_{ш1}$ — ширина открытия паза (при открытых пазах $b_{ш1} = b_{п1}$); k_k — коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов статора на магнитную проводимость рассеяния между коронками зубцов, определяемый в зависимости от коэффициента зубцовой зоны статора (рис. 11-16)

$$k_{в\delta} = b_{ш1} / (\delta k_\delta) \quad (11-120)$$

Суммарный коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния обмотки статора

$$\lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{л1} + \lambda_k \quad (11-121)$$

Здесь коэффициенты магнитной проводимости потока рассеяния определяют для пазовой части $\lambda_{п1}$ — по (9-185) — (9-187) для лобовых частей $\lambda_{л1}$ — по (9-191). При этом значение k_i должно быть уменьшено на $k_{п.д.}$, определяемую по (11-45).

Правильность определения активного и индуктивного сопротивления обмотки статора проверяют путем расчета r_{1*} и $x_{\sigma*}$ по разным формулам (9-179), (9-180), (9-194) и (9-195), результаты расчета должны совпадать. Сопротивления обмотки статора рассчитывают в последовательности, изложенной в § 9-8.

Пример расчета см. на стр. 350.

§ 11-8. Расчет магнитной цепи при нагрузке

Основные положения. При нагрузке обмотка статора создает поле реакции якоря. Из-за неравномерности воздушного зазора и соответственно магнитного сопротивления вдоль окружности ротора статора явнополюсных синхронных машин возникает необ-

Таблица 11-4

α	Значения коэффициентов при								
	$\delta''/\delta' = 1$			$\delta''/\delta' = 1,5$			$\delta''/\delta' = 2$		
	$\delta/\tau = 0$	0,01	0,3	$\delta/\tau = 0$	0,01	0,03	$\delta/\tau = 0$	0,01	0,03
Коэффициент $k_{ад}$									
0,5	0,91	0,90	0,89	0,93	0,92	0,91	0,93	0,92	0,91
0,6	0,88	0,87	0,86	0,90	0,89	0,88	0,90	0,89	0,88
0,7	0,85	0,84	0,83	0,87	0,86	0,86	0,88	0,87	0,87
0,8	0,82	0,81	0,80	0,85	0,84	0,84	0,85	0,84	0,84
0,9	0,80	0,80	0,79	0,83	0,82	0,82	0,83	0,82	0,82
Коэффициент $k_{а\sigma}$									
0,5	0,2	0,27	0,35	0,18	0,25	0,34	0,17	0,23	0,33
0,6	0,29	0,35	0,42	0,25	0,32	0,40	0,22	0,30	0,38
0,7	0,39	0,44	0,51	0,35	0,40	0,48	0,31	0,37	0,44
0,8	0,50	0,55	0,61	0,45	0,50	0,56	0,40	0,45	0,51
0,9	0,64	0,68	0,71	0,56	0,61	0,63	0,50	0,53	0,57

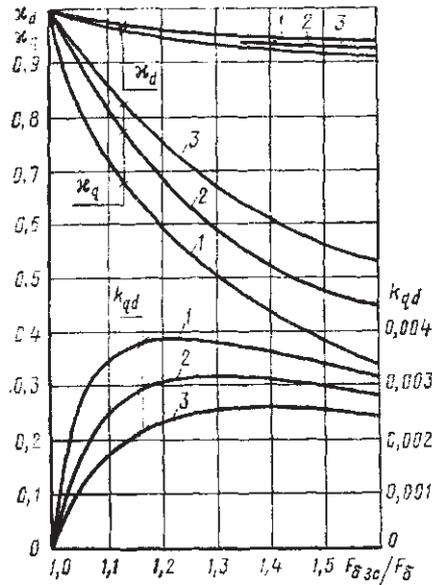


Рис. 11-17. Зависимость k_{qd} , κ_d , $\kappa_q = f(F_{\delta_{3c}}/F_{\delta})$:
 1 — при $\delta''/\delta' = 1$; 2 — при $\delta''/\delta' = 1,5$; 3 — при $\delta''/\delta' = 2$

Значения коэффициентов k_{ad} и k_{aq} в зависимости от величины полюсной дуги α при разных величинах и форме воздушного зазора δ (без учета насыщения) приведены в табл. 11-4.

Насыщение магнитной цепи уменьшает первую гармонику продольного поля. При определении F_{ad} и F_{aq} насыщение обычно учитывают приближенно введением поправочных коэффициентов κ_d и κ_q , значения которых в зависимости от степени насыщения, выраженной отношением $F_{\delta_{3c}}/F_{\delta}$ (при отношении зазоров $\delta''/\delta' = 1,0 \div 2,0$), приведены на рис. 11-17.

Влияние поперечного поля на величину первой гармоники продольного поля равноценно действию добавочной МДС F_{qd} : при концентричном зазоре

$$F_{qd} = k_{qd} \frac{b_{н.п}}{\delta} F_a \cos \psi; \quad (11-122)$$

при эксцентричном зазоре

$$F_{qd} = k_{qd} \frac{c}{\delta} F_a \cos \psi. \quad (11-123)$$

Значения коэффициента k_{qd} приведены на рис. 11-17.

ходимость рассматривать действие реакции якоря F_a по продольной d и поперечной q осям в отдельности. При этом $F_d = F_a \sin \psi$, $F_q = F_a \cos \psi$. Здесь ψ — угол сдвига между током якоря I_1 и ЭДС $E_{\delta d}$, наведенной результирующим продольным потоком.

МДС обмотки возбуждения при нагрузке можно определить, используя векторную диаграмму Blondеля и частичные характеристики намагничивания машины.

При построении векторной диаграммы для определения ЭДС, наведенных полями реакции якоря, используют характеристику х. х. При этом МДС F_d и F_q обмотки статора заменяют эквивалентными по своему действию МДС $F_{ad} = k_{ad} F_d$ и $F_{aq} = k_{aq} F_q$ обмотки возбуждения, вводя коэффициенты k_{ad} и k_{aq} . Значения коэффициентов k_{ad} и k_{aq} в зависи-

мы и частичных характеристик намагничивания в относительных единицах за базисные принимают значения магнитного потока Φ при номинальном фазном напряжении и соответствующие ему МДС обмотки возбуждения $F_{\Sigma(1)}$ и ЭДС $E_0 = U_{1n}$.

Под углом φ к U_1 в сторону опережения или отставания в зависимости от заданного характера нагрузки (см. рис. 11-19) строят вектор тока I_1 . К вектору U_1 прибавляют вектор падения напряжения в индуктивном сопротивлении рассеяния статора $j I x_\sigma$ и определяют ЭДС E_δ от результирующего магнитного потока взаимоиנדукции Φ_v в воздушном зазоре δ .

По частичной характеристике $\Phi = f(F_{\delta sc})$ (см. рис. 11-18) и прямой, являющейся продолжением прямолинейной части этой характеристики, для ЭДС E_δ , полученной из векторной диаграммы, определяют значения $F_{\delta sc}$ и F_δ , отношение которых $F_{\delta sc}/F_\delta$ приближенно выражает степень насыщения машины.

Для известных значений α , δ , δ''/δ' , $F_{\delta sc}/F_\delta$ по кривым (см. рис. 11-18) и табл. 11-2 находят значения коэффициентов χ_a , k_{qa} , k_{ad} , k_{aq} .

Амплитуда МДС реакции якоря

$$F_a = 0,45 m_1 \omega_1 k_{об1} I_1 k_{\Phi a} / p. \quad (11-125)$$

При этом для явнополюсных машин обычного исполнения принимают коэффициент формы поля реакции якоря $k_{\Phi a} = 1$. При гребенчатой конструкции полюсных наконечников ротора $k_{\Phi a} = 1,0 \div 1,15$.

Для учета возможных технологических отклонений параметров магнитной цепи от расчетных полученное значение МДС возбуждения увеличивают на 10—20%.

Магнитную цепь при нагрузке рассчитывают в такой последовательности.

Строят частичные характеристики намагничивания $\Phi = f(F_{\delta sc})$, $\Phi_a = f(F_{\delta sc})$	По форме табл. 11-2 и 11-3, рис. 11-18
$\Phi_{12} = f(F_{12})$ (о. е.)	
Строят векторную диаграмму Blondеля (о. е.) (рис. 11-19)	По форме рис. 11-19
ЭДС, индуцированная магнитным потоком воздушного зазора (о. е.)	E_δ по векторной диаграмме рис. 11-19 (на рис. 11-19 знак «*» опущен)
МДС для магнитной цепи воздушного зазора и статора (о. е.)	$F_{\delta sc}$ — по рис. 11-18
МДС для воздушного зазора (о. е.)	F_δ — по рис. 11-18
Предварительный коэффициент насыщения магнитной цепи статора	$k'_{нас} = F_{\delta sc} / F_\delta \quad (11-126)$
Поправочные коэффициенты, учитывающие насыщение магнитной цепи	χ_a, χ_q, k_{qa} — по рис. 11-17
Коэффициенты реакции якоря	k_{ad}, k_{aq} — по табл. 11-4
Коэффициент формы поля реакции якоря	$k_{\Phi a}$ — по § 11-8
Амплитуда МДС обмотки статора (А)	F_a — по (11-125)
То же, в относительных единицах	$F_{a*} = F_a / F_\Sigma \quad (11-127)$
Поперечная составляющая МДС реакции якоря, с учетом насыщения, отнесенная к обмотке возбуждения (о. е.)	$F_{aq*} / \cos \psi = \chi_q k_{aq} F_{a*} \quad (11-128)$

ЭДС обмотки статора, обусловленная действием МДС $F'_{aq}/\cos\psi$ (о. е.)
 Направление вектора ЭДС $E_{\delta d}$, определяемое построением вектора $E_{aq}/\cos\psi$ на продолжении вектора $jI x_r$ (точка Q)

$E'_{aq}/\cos\psi$ — по рис. 11-18

$\psi, \cos\psi, \sin\psi$ — по рис. 11-19

Продольная МДС реакции якоря с учетом влияния поперечного поля при концентричном зазоре
 То же, при эксцентричном зазоре

$$F'_{ad*} = \lambda_d k_{ad} F_{a*} \sin\psi + k_{qd} F_{a*} \cos\psi \cdot \tau \alpha' / \delta \quad (11-129)$$

$$F'_{ad*} \approx \lambda_d k_{ad} F_{a*} \sin\psi + k_{qd} F_{a*} \cos\psi \cdot \pi / \delta \quad (11-130)$$

Продольная составляющая ЭДС, наводимая в обмотке статора результирующим потоком по продольной оси $\Phi_{\delta d}$, (о. е.)

$$E_{\delta d} = \Phi_{\delta d} \text{ — по рис. 11-19}$$

МДС по продольной оси, необходимая для создания ЭДС $E_{\delta d}$ (о. е.)

$$F_{\delta d} \text{ — по рис. 11-18}$$

Результирующая МДС по продольной оси (о. е.)

$$F_{\delta a*} = F_{\delta d*} + F'_{ad*} \quad (11-131)$$

Магнитный поток рассеяния при действии МДС $F_{\delta a}$ (о. е.)

$$\Phi_r \text{ — по рис. 11-18}$$

Результирующий магнитный поток (о. е.)

$$\Phi_{r*} = \Phi_{\delta a*} + \Phi_{c*} \quad (11-132)$$

МДС, необходимая для создания магнитного потока Φ_{r*} (о. е.)

$$F_{rc} \text{ — по рис. 11-18}$$

МДС обмотки возбуждения при нагрузке (о. е.)

$$F_{rn*} = F_{\delta a*} + F_{rc*} \quad (11-133)$$

То же (А)

$$F_{rn} = F_{rn*} F_{\Gamma} (I) \quad (11-134)$$

Примеры расчета машин

7. Расчет магнитной цепи при нагрузке

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
306	По данным табл. 11-2 и 11-3 строим частичные характеристики намагничивания в о.е. (рис. 11-18) $\Phi = f(F_{\delta ac})$; $\Phi_{rc} = f(F_{rc})$; $\Phi_c = f(F_{\delta ac})$			
307	Строим векторные диаграммы Blondеля (рис. 11-19) по следующим исходным данным:			
			$U_1=1; I_1=1$ $\cos\varphi=0,8$ $\varphi=36,87^\circ$ (отстающий) $x_{c*} = 0,078$	$U_1=1; I_1=1; \cos\varphi=0,9$ $\varphi=25,84^\circ$ (опережающий) $x_{c*} = 0,159$
308	E_{δ} , о.е.	рис. 11-19	1,06	1,09
309	F_{δ} , о.е.	рис. 11-18	0,8	0,81
310	$F_{\delta ac}$, о.е.	рис. 11-18	0,9	0,90
311	$k'_{нас}$	(11-126)	0,9/0,8=1,13	0,90/0,81=1,11
312	x_d , о.е.	рис. 11-17	0,95	0,97
313	x_q , о.е.	то же	0,67	0,80
314	k_{qd}	рис. 11-17	0,0036	0,0025
315	k_{ad}	табл. 11-4	0,85	0,87

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
316	k_{aq}	табл. 11-4	0,32	0,34
317	$k_{\Phi a}$	§ 11-8	1,05	1,0
318	F_a, A	(11-125)	$0,45 \cdot 3 \cdot 70 \times 0,89 \times$ $\times 54,1 \cdot 1,05 \cdot 2 =$ $= 2388$	$0,45 \cdot 3 \cdot 360 \cdot 0,94 \cdot 45,5 \cdot 1,0 \cdot 4 =$ $= 5196$
319	$F_{a*}, \text{о.е.}$	(11-127)	$2388 \cdot 890 = 2,68$	$5196 \cdot 2718 = 1,91$
320	$F_{aq}/\cos\psi,$ о.е.	(11-128)	$0,67 \cdot 0,32 \cdot 2,68 =$ $= 0,57$	$0,80 \cdot 0,34 \cdot 1,91 = 0,52$
321	$E_{aq}/\cos\psi,$ о.е.	рис. 11-18	0,73	0,65
322	$\psi, \text{град}$	рис. 11-19	61°	50°
323	$\cos\psi$	То же	0,48	0,64
324	$\sin\psi$		0,87	0,76
325	$F'_{ad*}, \text{о.е.}$	(11-129)	$0,95 \cdot 0,85 \cdot 2,68 \times$ $\times 0,87 + 0,0036 \times$ $\times 2,68 \cdot 0,48 \times$ $\times 224,5 \cdot 0,66/1 =$ $= 2,56$	—
326	$F'_{ad}, \text{о.е.}$	(11-130)	—	$0,97 \cdot 0,87 \cdot 1,91 \cdot 0,76 + 0,0025 \times$ $\times 1,91 \cdot 0,64 \cdot 247,3 \cdot 2,5 = 1,52$
327	$E_{\delta d} = \Phi_{\delta d},$ о.е.	рис. 11-19	0,99	1,04
328	$F_{\delta d}, \text{о.е.}$	рис. 11-18	0,82	0,84
329	$F_{\delta d*}, \text{о.е.}$	(11-131)	$0,82 + 2,56 = 3,38$	$0,84 + 1,52 = 2,36$
330	$\Phi_{\delta d}, \text{о.е.}$	рис. 11-18	0,23	0,28
331	$\Phi_{\delta d*}, \text{о.е.}$	(11-132)	$0,99 + 0,23 = 1,22$	$1,04 + 0,28 = 1,32$
332	$F_{\text{ис}}, \text{о.е.}$	рис. 11-18	0,42	0,38
333	$F_{\text{п.н.}}, \text{о.е.}$	(11-133)	$3,38 + 0,42 = 3,8$	$2,36 + 0,38 = 2,74$
334	$F_{\text{п.н.}}, A$	(11-134)	$3,8 \cdot 890 = 3382$	$2,74 \cdot 2718 = 7450$

§ 11-9. Система возбуждения

Питание системы возбуждения современных явнополюсных синхронных машин с $h \leq 500$ мм осуществляется через статические выпрямительные регулирующие устройства от дополнительных обмоток, закладываемых в те же пазы статора, где расположена основная обмотка. В этом случае вопрос о напряжении возбуждения и параметрах обмотки возбуждения решается в комплексе с параметрами дополнительной обмотки статора.

В случае, когда дополнительную обмотку выполняют аналогично основной, напряжение на ее зажимах U_d может быть рассчитано по соотношению витков W_d и W_1 . Напряжение на обмотку возбуждения подают через контактные кольца и металлографитные щетки марки МГ4. В связи с этим при нахождении напряжения воз-

буждения должно быть учтено падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{\text{щ}} \approx 2$ В.

Обмотку возбуждения явнополюсных синхронных машин выполняют так же, как и у машин постоянного тока, в виде катушек, размещаемых на сердечниках полюсов ротора. Полюсные катушки синхронных машин небольшой мощности ($h \leq 315$ мм) изготавливают многослойными из изолированного медного провода прямоугольного поперечного сечения, площадью не более 25 мм^2 (по технологическим соображениям), при предпочтительном соотношении сторон проводника в пределах 1,4—1,8. Провод наматывают на широкую сторону. Изоляцию обмотки ротора выполняют по приложению 23. При выборе марки провода следует руководствоваться табл. 10-14.

Многослойные катушки выполняют либо в виде ровных параллелепипедов, либо ступенчатой формы, которая дает возможность лучше использовать междуполюсное окно.

Площадь поперечного сечения проводника не должна быть менее $6,0 \text{ мм}^2$, иначе снижается заполнение катушки медью и ухудшается теплоотдача; по этой же причине не рекомендуется применять провода с круглым поперечным сечением. Если это условие не соблюдается, то следует перейти на более низкое напряжение возбуждения, с внесением необходимых изменений в параметры дополнительной обмотки статора.

В синхронных машинах большей мощности (при $h > 315$ мм) обмотки возбуждения изготавливают в виде однослойных катушек из неизолированного медного проводника, намотанного на ребро. Изоляцию обмотки выполняют по приложению 23. Крайние витки катушки выполняют с усиленной изоляцией, толщиной ~ 2 мм.

Проверка возможности размещения обмоток полюсов в междуполюсном окне состоит в расчете размеров катушек по ширине и высоте, с последующим вычерчиванием в масштабе эскиза междуполюсного окна.

В многослойных катушках из изолированных проводников прямоугольного поперечного сечения производят раскладку проводников, определяя их количество по ширине $N_{\text{ш}}$ и по высоте $N_{\text{в}}$.

В тех случаях, когда между соседними полюсами недостаточно места для размещения обмотки, однослойные катушки выполняют ступенчатыми из двух секций. Секцию катушки со стороны сердечника ротора выполняют из медной полосы меньшей ширины при равновеликой площади поперечного сечения проводника.

При определении размеров катушек следует иметь в виду, что при намотке и пропитке катушки разбухают. Это разбухание учитывают соответствующими коэффициентами, указанными в § 10-10.

При выборе формы и марки провода для полюсных катушек синхронных машин следует исходить из данных табл. 10-14. При определении размеров полюсных катушек учитывают толщину изоляции $b_{\text{и}}$ и необходимый зазор $b_{\text{з}}$ между изолированным сер-

дечником полюса и катушкой, двустороннее значение которых приведено ниже:

h , мм	80—200	215—315	355—450
$2(b_n + b_s)$, мм	5	6	7

Форма полюсных катушек зависит также от размеров поперечного сечения сердечника полюса и провода. Многослойные полюсные катушки выполняют в соответствии с рис. 11-20, а. Однослойные катушки, намотанные из неизолированного медного провода на ребро, при $b_n \geq 200$ мм, тоже выполняют в соответствии с рис. 11-20, а, что обеспечивает минимальные допустимые радиусы закругления проводов, исключая возникновение в них трещин при намотке; при $b_n < 200$ мм однослойные катушки

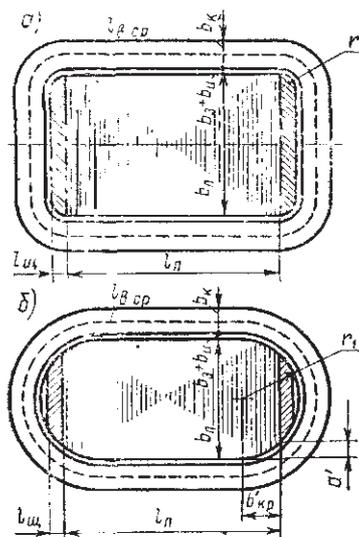


Рис. 11-20. Эскизы полюсных катушек:

а — однослойная при $b_n > 200$ мм и многослойная; б — однослойная при $b_n \leq 200$ мм

выполняют по рис. 11-20, б. При этом следует придерживаться соотношения:

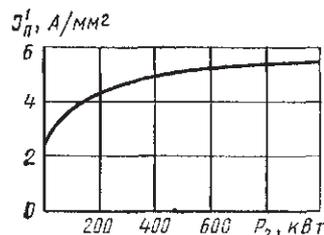


Рис. 11-21. Средние значения $J_n' = f(P_2)$

выполняют по рис. 11-20, б. При этом следует придерживаться соотношения:

b_n , мм	60	80	110	150	200
$b_{кр}$, мм	10	12,5	15	20	30

Обмотку возбуждения рассчитывают в такой последовательности.

Напряжение дополнительной обмотки статора (В) $U_d = U_i \omega_d / \omega_1$ (11-135)

Предварительная средняя длина витка обмотки возбуждения (мм) $l'_{ср.н} = 2,5(l_n + b_n)$ (11-136)

Предварительная площадь поперечного сечения проводника обмотки возбуждения (мм²) $S' = \frac{1,15m_T 2p F_{п.н} l'_{ср.н}}{57(U_d - 2) \cdot 10^3}$ (11-137)

Предварительная плотность тока в обмотке возбуждения (А/мм²) J'_n — по рис. 11-21

Предварительное количество витков одной полюсной катушки $w'_n = 1,15 F_{п.н} / (J'_n S')$ (11-138)

Расстояние между катушками смежных полюсов (мм) $a_k = \frac{l_{п\tau}}{h'_n \cdot 10^3} + a_{доп}$ (11-139)

Многослойная полюсная катушка

Марка провода	По табл. 10-14
Размеры проводника без изоляции (мм)	$a \times b$ — по приложению 2
То же, с изоляцией	$a' \times b'$ — по приложению 3
Площадь поперечного сечения проводника (мм ²)	S — по приложению 2
Предварительное наибольшее количество витков в одном слое	$N'_n = (h_n - h_{np}) / (1,05b')$ (11-140)
Предварительное количество слоев обмотки по ширине полюсной катушки	$N'_m = w'_n / N'_n$ (11-141)
Раскладка и уточнение числа витков катушки	N_n, N_m, w_n — по рис. 11-22, а
Размер полюсной катушки по ширине (мм)	$b_{к.п} = 1,05N_m a'$ (11-142)
Размер полюсной катушки по высоте (мм)	$h_{к.п} = 1,05N_n b'$ (11-143)
Средняя длина витка катушки (мм)	$l_{ср.п} = 2(l_n + b_n) + \pi [b_n + 2(b_a + b_n)]$ (11-144)

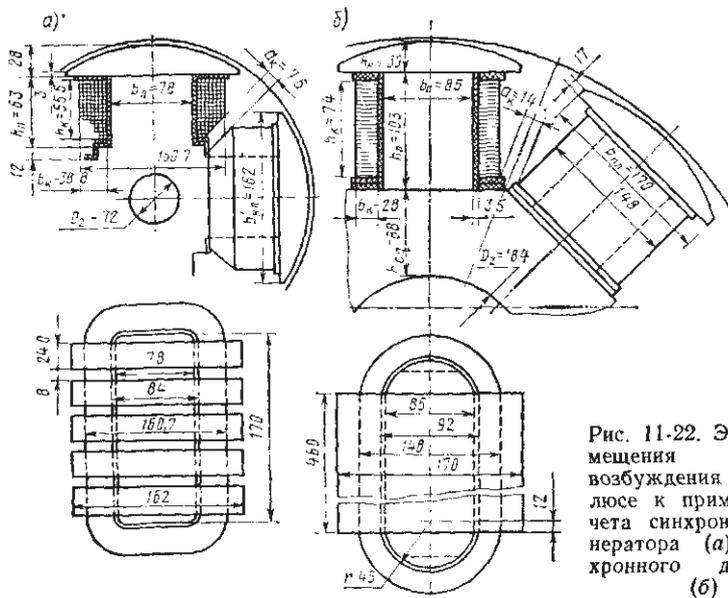


Рис. 11-22. Эскиз размещения катушки возбуждения на полюсе к примеру расчета синхронного генератора (а) и синхронного двигателя (б)

Однослойная полюсная катушка

Предварительный размер проводника обмотки из неизолированной полосовой меди, навиваемой на ребро, по ширине (мм)	$b' = \frac{\pi(D_1 - 2\delta' - 2h_{к.п} - 2h'_n)}{4p} - 0,5 [b_n + 2(b_a + b_n) + a_k]$ (11-145)
То же, по толщине	$a = [h'_n - 2(b_a + b_n) - b_{np}] / w_n$ (11-146)
Размеры проводника без изоляции (мм)	$a \times b$ — по приложению 2
Площадь поперечного сечения проводника (мм ²)	S — по приложению 2

Минимальный допустимый радиус закругления проводника (мм)	$r_{\min} > 0,05b^2/a$	(11-147)
Фактический средний радиус закругления проводника, навиваемого на ребро, по рис. 11-21,б (мм)	$r_1 = 0,5[b_n + 2(b_a + b_n)]$	(11-148)
То же, по рис. 11-21,а	$r_1 = l_{\text{ш}} + b_a + b_n$	(11-149)
Размер полюсной катушки по ширине (мм)	$b_{к.п} = b$ — по рис. 11-22,б	
Раскладка витков по высоте катушки	N_n — по рис. 11-22,б	
Размер полюсной катушки по высоте (мм)	$h_{к.п} = 1,03[N_n a + (N_n - 3)h_n + h'_n]$	(11-150)
Средняя длина витка катушки, выполненной по рис. 11-20,б	$l_{ср.п} = 2(l_n - 2b'_{кр}) + 2\pi(r_1 + b_{к.п})$	(11-151)
То же, выполненной по рис. 11-20,а	$l_{ср.п} = 2(l_n + b_n - r_1) + 2\pi(r_1 + b_{к.п})$	(11-152)
Ток возбуждения при номинальной нагрузке (А)	$I_{п.н} = F_{п.н}/w_{п.н}$	(11-153)
Уточненная плотность тока в обмотке возбуждения (А/мм ²)	$J_n = I_{п.н}/(a_n S)$	(11-154)
Общая длина всех витков обмотки возбуждения (м)	$L_n = 2p w_{п.н} l_{ср.п} \cdot 10^{-3}$	(11-155)
Масса меди обмотки возбуждения (кг)	$m_{м.н} = \gamma_m \cdot 8,9 L_n S \cdot 10^{-3}$	(11-156)
Сопротивление обмотки возбуждения при температуре 20°C (Ом)	$r_n = L_n / (\rho_{20} a_n S)$	(11-157)
Максимальный ток возбуждения (А)	$I_{п. \max} = U_n / (r_n m_T)$	(11-158)
Коэффициент запаса возбуждения	$I_{п. \max} / I_{п.н}$	(11-159)
Номинальная мощность возбуждения (Вт)	$P_n = U_n I_{п. \max}$	(11-160)

Здесь $h'_n = 2$ мм — высота усиленной изоляции крайних витков катушки; a_n — количество параллельных ветвей в цепи обмотки возбуждения; m_T — температурный коэффициент, принимаемый по табл. 4-1; наименьшее расстояние между катушками $a_{\text{доп}} = 7$, при $h \leq 280$ мм и $U_1 \leq 660$ В; $a_{\text{доп}} = 13$, при $U_1 = 6000$ В; $h_{\text{пр}}$ — толщина изолирующей шайбы из приложения 23; $U_n = U_n - 2$ — напряжение дополнительной обмотки за вычетом падения напряжения в шесточном контакте, равного 2 В; $\rho_{20} = 57$ См/мкм — удельная электрическая проводимость меди при 20°C.

Примеры расчета машин 8. Обмотка возбуждения

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
335	U_n , В	(11-135)	$400 \cdot 7 / 70 = 40$	$6000 \cdot 3 / 360 \approx 50$
336	$l'_{ср.п}$, мм	(11-136)	$2,5 (170 + 78) = 620$	$2,5 (460 + 85) \approx 1360$
337	S' , мм ²	(11-137)	$1,15 \cdot 1,38 \cdot 4 \cdot 3382 \cdot 620 = 6,1$	$1,15 \cdot 1,38 \cdot 8 \cdot 7450 \cdot 1360 = 46,6$
338	J'_n , А/мм ²	рис. 11-21	$57 (40 - 2) \cdot 10^3 = 3,5$	$57 (50 - 2) \cdot 10^3 = 5,0$
339	$w'_{п}$	(11-138)	$\frac{1,15 \cdot 3282}{3,5 \cdot 6,1} = 183$	$\frac{1,15 \cdot 7450}{5 \cdot 46,6} = 37,7 \approx 38$
340	a_k , мм	(11-139), § 11-9	$\frac{170 \cdot 224,5}{63 \cdot 10^3} + 7 = 7,6$	$\frac{460 \cdot 247,3}{103 \cdot 10^3} + 13 = 14,0$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
341	—	§ 11-9, табл. 10-14 рис. 11-20	Принимаем медный провод ПЭТП-155 прямоугольного сечения с двусторонней толщиной изоляции 0,15 мм, катушка многослойная	Принимаем неизолированный ленточный медный провод. Изоляция между витками — асбестовая бумага толщиной 0,3 мм, катушка однослойная
342	$a \times b$, мм	приложение 2	1,90 × 3,15	—
343	$a' \times b'$, мм	то же	2,05 × 3,3	—
344	S , мм ²	«	5,622	—
345	$N'_в$	(11-140)	$(63-2 \cdot 5)/(1,05 \cdot 3,3) = 15,3$	—
346	$N'_{ш}$	(11-141)	$183/15,3 = 12$	—
347	$N_{ш}$	рис. 11-22	Всего 18 слоев 4 слоя по 16 витков 3 слоя по 13 витков 3 слоя по 10 витков 4 слоя по 8 витков 4 слоя по 6 витков	—
348	$N_в$	рис. 11-22	16	—
349	$w_{ш}$	рис. 11-22	189	—
350	$b_{к.ш}$, мм	(11-142)	$1,05 \cdot 18 \cdot 2,05 = 38,8$	—
351	$h_{к.ш}$, мм	(11-143)	$1,05 \cdot 16 \cdot 3,3 = 55,5$	—
352	$l_{ср.ш}$, мм	(11-144)	$2(170+78) + 3,14 \times [38,8+6] = 650$	—
353	b , мм	(11-145)	—	$3,14(630-2 \cdot 2,2-2 \cdot 30-2 \cdot 103) = 4 \cdot 4$ $-0,5(85+7+14) = 17,6$ $(103-7-10)/38 = 2,3$ $1,56 \times 28$
354	a , мм	(11-146)	—	43,2
355	$a \times b$, мм	приложение 2	—	$0,05 \cdot 28^2 / 1,56 = 25,1$
356	S , мм ²	то же	—	$0,5(85+7) = 46$
357	$r_{мин}$, мм	(11-147)	—	28
358	r_1 , мм	(11-148)	—	38
359	$b_{к.ш}$, мм	рис. 11-22, а	—	—
360	$N_в = w_{ш}$	рис. 11-22, б	—	—
361	$h_{к.ш}$, мм	(11-150)	—	$1,03[38 \cdot 1,56 + (38-3) \times 0,3+2] = 74$
362	$l_{ср.ш}$, мм	(11-151)	—	$2(460-2 \cdot 13) + 3,14 \cdot 2 \cdot 46 + 28 = 1245$ $7450/38 = 196$
363	$I_{ш.н}$, А	(11-153)	$3382/189 = 17,9$	—
364	$a_{ш}$	§ 11-9	—	—
365	$J_{ш}$, А/мм ²	(11-154)	$17,9/(1 \cdot 5,622) = 3,18$	$196/(1 \cdot 43,2) = 4,55$
366	$L_{ш}$, м	(11-155)	$4 \cdot 189 \cdot 650 \cdot 10^{-9} = 492$	$8 \cdot 38 \cdot 1245 \cdot 10^{-9} = 378$
367	$m_{ш}$, кг	(11-156)	$8,9 \cdot 492 \cdot 5,622 \cdot 10^{-8} = 27,7$	$8,9 \cdot 378 \cdot 43,2 \cdot 10^{-8} = 146,0$
368	$r_{ш}$, Ом	(11-157)	$492/(57 \cdot 1 \cdot 5,622) = 1,367$	$378/(57 \cdot 1 \cdot 43,2) = 0,154$
369	$I_{ш.мах}$, А	(11-158)	$(40-2)/(1,367 \cdot 1,38) = 20,2$	$(50-2)/(0,154 \cdot 1,38) = 226$
370	$I_{ш.мах}/I_{ш.н}$	(11-159)	$20,2/17,9 = 1,13$	$226/196 = 1,15$
371	$P_{ш}$, Вт	(11-160)	$(40-2) 20,2 = 770$	$(50-2) 226 = 10800$

§ 11-10. Параметры обмоток и постоянные времени

Под параметрами обмоток синхронных машин обычно понимают их активные и индуктивные сопротивления, выраженные в физических или относительных единицах.

Определение активных и индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора необходимо для расчета номинальных параметров и рабочих характеристик синхронной машины в установившихся симметричных и несимметричных режимах, а также переходных процессов.

Некоторые параметры обмоток для установившихся режимов уже были определены в § 11-7—11-9. Расчет других сопротивлений обмоток и постоянных времени производят в такой последовательности.

Сопротивления обмотки статора для установившегося режима

Коэффициент продольной реакции якоря	k_{ad} — по табл. 11-4	
Коэффициент насыщения при $E=0,5$	$k_{нас(0,5)} = 0,5F_{\Sigma}/(F_{\delta} + F_{\Sigma})$	(11-161)
МДС для воздушного зазора при $E=1,0$ (о. е.)	$F_{\delta(1)}$ — по табл. 11-2 и 11-3	
Индуктивное сопротивление продольной реакции якоря (о. е.)	$x_{ad*} = k_{ad}F_{\Sigma}/(k_{нас(0,5)}F_{\delta(1)})$	(11-162)
Коэффициент поперечной реакции якоря	k_{aq} — по табл. 11-4	
Индуктивное сопротивление поперечной реакции якоря (о. е.)	$x_{aq*} = 0,5k_{aq}(1 + k_{\delta})F_{\Sigma}/k_{нас(0,5)}F_{\delta(1)}$	(11-163)
Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси (о. е.)	$x_{d*} = x_{ad*} + x_{aq*}$	(11-164)
Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси (о. е.)	$x_{q*} = x_{aq*} + x_{\sigma*}$	(11-165)

Сопротивления обмотки возбуждения

Активное сопротивление обмотки возбуждения, приведенное к обмотке статора, при рабочей температуре, соответствующей принятому классу нагревостойкости изоляции (о. е.)	$r_{\Sigma} = \frac{3,6m_{\tau}F_{\Sigma}k_{ad}^2l_{\Sigma}}{10^4\Phi_f\omega_n S_{\Sigma}}$	(11-166)
Коэффициент магнитной проводимости потоков рассеяния обмотки возбуждения	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma, \text{н}} + 0,65\lambda_{\Sigma, \text{с}} + 0,38\lambda_{\Sigma, \text{в}}$	(11-167)
Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения (о. е.)	$x_{\Sigma*} = 1,27k_{ad}x_{ad*} \left(1 + \frac{4k_{нас(0,5)}F_{\delta}l_{\Sigma}\lambda_{\Sigma}}{\Phi \cdot 10^4} \right)$	(11-168)
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения (о. е.)	$x_{\Sigma\sigma*} = x_{\Sigma*} - x_{ad*}$	(11-169)

Сопротивления демпферной (пусковой) обмотки

Относительное зубцовое деление демпферной обмотки (о. е.)	$i_{2*} = \pi t_2/\tau$	(11-170)
---	-------------------------	----------

Коэффициент распределения демпферной обмотки (углы выражены в радианах)

$$k_{p2} = \sin(N_2 t_{2*}) / (N_2 \sin t_{2*}) \quad (11-171)$$

Коэффициент магнитной проводимости потока рассеяния по зубцам полюсного наконечника

$$\lambda_{л3} \approx t_2 / (g_d \delta) \quad (11-172)$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния полюсов

$$\lambda_{д.п} = \left(0,785 - \frac{b_{ш2}}{2d_g} \right) + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} \quad (11-173)$$

Коэффициенты C_d и C_q
Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей демпферной обмотки по продольной оси
То же, по поперечной оси
Коэффициент магнитной проводимости рассеяния демпферной обмотки по продольной оси

По рис 11-23
 $\lambda_{дд} \approx 0,019 \tau C_d / N_2 \quad (11-174)$

$$\lambda_{длq} \approx 0,019 \tau C_q / N_2 \quad (11-175)$$

$$\lambda_{дd} = \frac{l_{шп}}{10N_2} (\lambda_{длп} + \lambda_{д3}) + \lambda_{дд} \quad (11-176)$$

$$\lambda_{дq} = \frac{l_{шп}}{10N_2} (\lambda_{длп} + \lambda_{д3}) + \lambda_{длq} \quad (11-177)$$

То же, по поперечной оси

Индуктивное сопротивление полной демпферной обмотки по продольной оси (о. е.)

$$x_{дd*} = \frac{3,9 F_d \lambda_{дd}}{\Phi \cdot 10^8 (1 - k_{p2})} \quad (11-178)$$

То же, по поперечной оси

$$x_{дq*} = \frac{3,9 F_d \lambda_{дq}}{\Phi \cdot 10^8 (1 + k_{p2})} \quad (11-179)$$

Индуктивное сопротивление неполной демпферной обмотки по поперечной оси (о. е.)

$$x_{дq*} \approx (3 + 4) x_{дd*} \quad (11-180)$$

Активное сопротивление стержней демпферной обмотки по продольной оси (о. е.)

$$r_{cd*} = \frac{1,57 \rho_{2(t)} l'_{ст} k_{ad} k_{\delta} \delta x_{ад*}}{(1 - k_{p2}) N_2 S l_{шп} k_a \tau f_1} \quad (11-181)$$

То же, по поперечной оси

$$r_{cq*} \approx 0,75 r_{cd*} \quad (11-182)$$

Активное сопротивление короткозамыкающих колец демпферной обмотки по продольной оси (о. е.)

$$r_{kd*} = \frac{0,34 \rho_{к(t)} N_2 t_2 k_{ad} k_{\delta} \delta x_{ад*}}{(1 - k_{p2}) S_c l_{шп} k_a k_B \tau f_1} \quad (11-183)$$

То же, по поперечной оси

$$r_{kq*} \approx 1,5 r_{kd*} \quad (11-184)$$

Активное сопротивление полной демпферной обмотки по продольной оси (о. е.)

$$r_{дd*} = r_{cd*} + r_{kd*} \quad (11-185)$$

То же, по поперечной оси

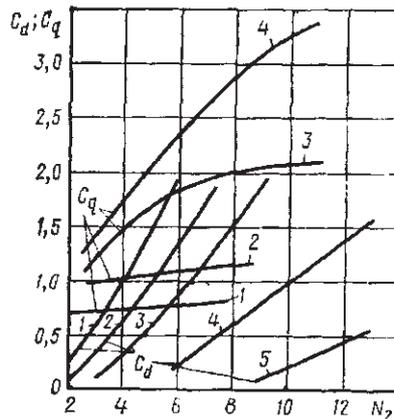
$$r_{дq*} = r_{cq*} + r_{kq*} \quad (11-186)$$

Активное сопротивление неполной демпферной обмотки по поперечной оси (о. е.)

$$r_{дq*} = (8 + 12) r_{дd*} \quad (11-187)$$

Здесь N_2 — количество стержней демпферной обмотки на полюс; коэффициент $g_d \approx 14$ при $\delta''/\delta' = 1$; $g_d \approx 16,5$ при $\delta''/\delta' = 1,5$; коэффициенты C_d и C_q находят из рис. 11-23, в зависимости от N_2 и t_2/τ ; $\rho_{2(t)}$ и $\rho_{к(t)}$ — удельные значения сопротивления стержня и короткозамыкающего кольца (сегмента) при температуре $t = 115^\circ\text{C}$, соответствующей принятому классу нагревостойкости изоляции F (для меди $\rho_{2(115^\circ)} = \rho_{к(115^\circ)} = 0,0242$); k_a — коэффициент формы поля возбуждения, равный отношению амплитудного значения индукции основной волны поля к максимальному значению индукции этого поля

Рис. 11-23. Зависимость C_d и $C_q = f(N_2)$ при значениях t_{21}/τ , равных: 1 — 0,3; 2 — 0,2; 3 — 0,1; 4 — 0,05; 5 — 0,03



(табл. 11-5); при определении по (11-186) и (11-187) сопротивлений неполной демпферной обмотки большие значения коэффициентов берут при $N_2 > 6$ и $\alpha > 0,7$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м — магнитная проницаемость воздуха.

Таблица 11-5

α'	Коэффициент формы поля возбуждения k_{β} при								
	$\delta''/\delta' = 1,0$			$\delta''/\delta' = 1,5$			$\delta''/\delta' = 2,0$		
	$\delta/\tau = 0$	0,01	0,03	$\delta/\tau = 0$	0,01	0,03	$\delta/\tau = 0$	0,01	0,03
0,5	0,90	0,96	1,00	0,80	0,084	0,88	0,72	0,76	0,80
0,6	1,03	1,08	1,11	0,92	0,95	0,98	0,83	0,85	0,88
0,7	1,13	1,16	1,18	1,01	1,03	1,05	0,92	0,95	0,97
0,8	1,21	1,22	1,23	1,08	1,10	1,10	1,00	1,01	1,02
0,9	1,25	1,26	1,26	1,13	1,14	1,14	1,06	1,07	1,07

Переходные и сверхпереходные сопротивления обмотки статора

Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси (о. е.) $x'_{d*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{ad*}x_{\sigma*}}{x_{ad*} + x_{\sigma*}}$ (11-188)

То же, по поперечной оси $x'_{q*} \approx x_{q*}$ (11-189)

Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси при наличии демпферной обмотки (о. е.) $x''_{d*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{ad*}(x'_{d*} - x_{\sigma*})}{x_{ad*} + x'_{d*} - x_{\sigma*}}$ (11-190)

То же, по поперечной оси $x''_{q*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{aq*}x_{dq*}}{x_{aq*} + x_{dq*}}$ (11-191)

Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси при отсутствии демпферной обмотки, о. е. $x''_{d*} \approx x'_{d*}$ (11-192)

То же, по поперечной оси $x''_{q*} \approx x'_{q*} \approx x_{q*}$ (11-193)

Сопротивления для токов обратной и нулевой последовательности

Индуктивное сопротивление обмотки статора для токов обратной последовательности при работе машины на малое внешнее сопротивление (ближкое к к. з.) (о. е.) $x_{2*} = \sqrt{x'_{d*}x'_{q*}}$ (11-194)

То же, при большом внешнем индуктивном сопротивлении (х. х.) $x_{2*} = 0,5(x'_{d*} + x'_{q*})$ (11-195)

Индуктивное сопротивление двухслойной обмотки статора для токов нулевой последовательности (о. е.)

$$x_{0*} \approx \frac{1,1I_1 F_a}{10^3 \Phi q_1 k^2 y_1} \left[(\beta - 0,555) \times \right. \\ \times \frac{h_{\Pi 1}}{b_{\Pi 1}} + (3\beta - 2) \frac{h_4}{b_{\Pi 1}} \left. \right] + C \times \\ \times \frac{F_a(3\beta - 2)}{F_3 k^2 y_1} \left[0,39 \left(\beta - \frac{2}{3} \right) - \right. \\ \left. - \left(\beta - \frac{2}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3q_1} \right)^2 + 0,037 \right] \quad (11-196)$$

Активное сопротивление обмотки фазы статора для тока нулевой последовательности при рабочей температуре (о. е.) $r_{0*} \approx r_{1*}(20^\circ) m_T$ (11-197)

Здесь $b_{\pi 1}$ — ширина паза [при трапециевидных пазах принимают $b_{\pi 1} = 0,5(b_1 + b_2)$], мм; h_4 — высота верхней части паза, не занятая обмоткой; коэффициент $C = 0,355$ (при наличии демпферной обмотки) и $C = 0,71$ (при отсутствии демпферной обмотки).

Значения активных и индуктивных сопротивлений синхронных машин (выраженные в относительных единицах) обычно находятся в следующих пределах: $x_{0*} = 0,05 \div 0,2$; $r_{1*} = 0,008 \div 0,08$; $x_{d*} = 1,5 \div 2,9$; $x_{q*} = 0,6 \div 1,6$; $x'_{d*} = 0,2 \div 0,6$; $x''_{d*} = 0,15 \div 0,3$; $x''_{q*} = 0,15 \div 0,4$; $x_2 = 0,15 \div 0,35$; $x_0 = 0,02 \div 0,2$.

Постоянные времени

Обмотка возбуждения при разомкнутых обмотках статора и демпферной (с) $T_{d0} = x_{d0} / (\omega_1 r_{d0})$ (11-198)

То же, при замкнутой обмотке статора $T'_d = T_{d0} x'_{d*} / x_{d*}$ (11-199)

Демпферная обмотка при разомкнутых обмотках статора и возбуждения по продольной оси (с) $T_{d0} = \frac{x_{ad*} + x_{nd*}}{\omega_1 r_{d0}}$ (11-200)

То же, по поперечной оси $T_{dq0} = \frac{x_{aq} + x_{dq*}}{\omega_1 r_{dq*}}$ (11-201)

Демпферная обмотка по продольной оси при разомкнутой обмотке статора и замкнутой обмотке возбуждения (с) $T''_{d0} = \frac{x_{ad*} x_{no*} + x_{nd*} (x_{ad*} + x_{no*})}{\omega_1 r_{d0} (x_{no*} + x_{ad*})}$ (11-202)

То же, при короткозамкнутых обмотках возбуждения и статора $T''_d = T''_{d0} x''_{d*} / x'_{d*}$ (11-203)

Демпферная обмотка по поперечной оси при короткозамкнутой обмотке статора (с) $T''_q = T_{dq0} x''_{q*} / x_{q*}$ (11-204)

Обмотка статора при короткозамкнутых обмотках ротора $T_a = x_2 / (\omega r_{1*})$ (11-205)

Значения постоянных времени обмоток синхронных машин обычно находятся в следующих пределах: $T_{d0} = 1 \div 10$ с; $T'_d = 0,2 \div 2,5$ с; $T''_{d0} = 0,01 \div 0,08$ с; $T_a = 0,01 \div 0,5$ с; $T''_d = 0,01 \div 0,08$ с; $T''_q = 0,1 \div 0,5$ с.

Примеры расчета машин
9. Параметры обмоток и постоянные времени

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
Сопротивления обмоток статора при установившемся режиме				
372	$k_{ад}$	табл. 11-4	0,85	0,87
373	$k_{нас(с,с)}$	(11-161)	$\frac{422}{340+52} = 1,07$	$\frac{1264}{1025+109} = 1,114$
374	$F_{\delta(1)}, A$	табл. 11-2	679	—
375	$F_{\delta(1)}, A$	табл. 11-3	—	2060
376	$x_{ад*}, о. е.$	(11-162)	$\frac{0,85 \cdot 2388}{1,07 \cdot 679} = 2,79$	$\frac{0,87 \cdot 5196}{1,114 \cdot 2060} = 1,97$
377	$k_{аг}$	табл. 11-4	0,32	0,34
378	$x_{аг*}, о. е.$	(11-163)	$0,5 \cdot 0,32(1+1,16) \times \frac{2388}{1,07 \cdot 679} = 1,12$	$0,5 \cdot 0,34(1+1,32) \times \frac{5196}{1,114 \cdot 2060} = 0,9$
379	$x_{д*}, о. е.$	(11-164)	$2,79+0,0787=2,868$	$1,97+0,159=2,129$
380	$x_{г*}, о. е.$	(11-165)	$1,12+0,0787=1,198$	$0,9+0,159=1,059$
Сопротивления обмотки возбуждения				
381	$r_{пв}, о. е.$	(11-166)	$\frac{3,6 \cdot 1,38 \cdot 2388 \cdot 0,85^2}{10^8 \cdot 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot 50} \times \frac{650}{189 \cdot 5,622} = 0,005$	$\frac{3,6 \cdot 1,38 \cdot 5196 \times}{\times 0,87^2 \cdot 1245} \times \frac{10^6 \cdot 49,5 \cdot 10^{-3} \times}{\times 50 \cdot 38 \cdot 43,2} = 0,006$
382	$\lambda_{пв}$	(11-167)	$58,1+0,65 \cdot 74,5+0,38 \times \times 17,4=113,1$	$62,4+0,65 \cdot 62,9+0,38 \times \times 6,8=106$
383	$x_{пв*}, о. е.$	(11-168)	$\frac{1,27 \cdot 0,85 \cdot 2,79 \times}{4 \cdot 1,07 \cdot 679} \times (1 + \frac{170 \cdot 113,1}{17,5 \cdot 10^{-3}} \times \frac{1}{10^{11}}) = 3,11$	$\frac{1,27 \cdot 0,87 \cdot 1,97(1 + \frac{4 \cdot 1,114 \cdot 2060 \cdot 460 \cdot 106}{49,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{11}})}{49,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{11}} = 2,37$
384	$x_{пв*}, о. е.$	(11-169)	$3,11-2,79=0,32$	$2,37-1,97=0,4$
Сопротивления пусковой обмотки				
385	$t_{г*}, о. е.$	(11-170)	—	$3,14 \cdot 24,5/247,3=0,3$
386	$k_{р2}$	(11-171)	—	$\frac{\sin(7-0,3)}{(7 \sin 0,3)} = 0,44$
387	$\lambda_{дз}$	(11-172)	—	$24,5/(16,5 \cdot 2,5)=0,59$
388	$\lambda_{д.п}$	(11-173)	—	$(0,785 - \frac{3}{2 \cdot 10,1}) + \frac{2}{3} = 1,3$
389	C_d	рис. 11-23	—	1,2
390	C_g	рис. 11-23	—	1,9
391	$\lambda_{дл д}$	(11-174)	—	$0,019 \cdot 247,3 \cdot 1,2/7=0,805$
392	$\lambda_{дл г}$	(11-175)	—	$0,019 \cdot 247,3 \cdot 1,9/7=1,28$
393	$\lambda_{дл}$	(11-176)	—	$\frac{460}{10,7}(1,3+0,59)+0,805=13,2$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
394	λ_{dq}	(11-177)	—	$\frac{460}{10 \cdot 7} (1,3 + 0,59) + 1,28 =$ $= 13,7$
395	$x_{dd*}, \text{ о. е.}$	(11-178)	—	$\frac{3,9 \cdot 5196 \cdot 13,2}{49,5 \cdot 10^{-3} \times 10^8 (1 - 0,44)} = 0,096$
396	$x_{dq*}, \text{ о. е.}$	(11-179)	—	$\frac{3,9 \cdot 5196 \cdot 13,7}{49,5 \cdot 10^{-3} \times 10^8 (1 + 0,44)} = 0,039$
397	$r_{ed*}, \text{ о. е.}$	(11-181)	—	$\frac{1,57 \cdot 0,0242 \cdot 495 \cdot 0,87 \times 1,32 \cdot 2,5}{(1 - 0,44) 7 \cdot 78,5 \cdot 460 \times 4 \cdot 3 \cdot 14 \cdot 10^{-7} \cdot 1,97} \times$ $\times \frac{1,01 \cdot 247,3 \cdot 50}{0,75 \cdot 0,048} = 0,048$
398	$r_{cq*}, \text{ о. е.}$	(11-182)	—	$0,34 \cdot 0,0242 \cdot 7 \cdot 24,5 \times 0,87 \cdot 1,32 \cdot 2,5$
399	$r_{kd*}, \text{ о. е.}$	(11-183)	—	$\frac{(1 - 0,44) 199,1 \cdot 460 \times 1,97}{4 \cdot 3 \cdot 14 \cdot 10^{-7}} \times$ $\times \frac{1,01 \cdot 247,3 \cdot 50}{1,5 \cdot 0,01} = 0,01$
400	$r_{kq*}, \text{ о. е.}$	(11-184)	—	$1,5 \cdot 0,01 = 0,015$
401	$r_{dd*}, \text{ о. е.}$	(11-185)	—	$0,048 + 0,01 = 0,058$
402	$r_{dq*}, \text{ о. е.}$	(11-186)	—	$0,036 + 0,015 = 0,051$
Переходные и сверхпереходные сопротивления обмотки статора				
403	$x'_{d*}, \text{ о. е.}$	(11-188)	$0,0787 + \frac{2,79 \cdot 0,32}{2,79 + 0,32} =$ $= 0,36$	$0,159 + \frac{1,97 \cdot 0,4}{1,97 + 0,4} = 0,49$
404	$x'_{q*}, \text{ о. е.}$	(11-189)	1,198	$\frac{1,059}{0,159 + 0,096(0,49 - 0,159)} =$ $= 0,233$
405	$x''_{d*}, \text{ о. е.}$	(11-190)	—	$\frac{0,9 \cdot 0,039}{0,9 + 0,039} = 0,196$
406	$x''_{q*}, \text{ о. е.}$	(11-191)	—	—
407	$x'''_{d*}, \text{ о. е.}$	(11-192)	0,36	—
408	$x'''_{q*}, \text{ о. е.}$	(11-193)	1,198	—
Сопротивления для токов обратной и нулевой последовательности				
409	$x_{*2}, \text{ о. е.}$	(11-194)	$\sqrt{0,36 \cdot 1,198} = 0,66$	$\sqrt{0,233 \cdot 0,196} = 0,214$
410	$x_{*0}, \text{ о. е.}$	(11-195)	$0,5(0,36 + 1,198) = 0,78$	$0,5(0,233 + 0,196) = 0,215$

Потери на возбуждение синхронной машины складываются из потерь в обмотке возбуждения и потерь в щеточном контакте. Переходное падение напряжения в щеточном контакте принимают равным 2 В.

Добавочные потери при нагрузке. При нагрузке машины в стали и обмотке статора возникают добавочные потери, вызываемые главным образом полями рассеяния. Существующие методы расчета этих потерь сложны. Добавочные потери для синхронных машин мощностью до 1000 кВ·А согласно ГОСТ 11828—75 принимают равными 0,5% от полезной мощности (для генераторов) или от подводимой (для двигателей). При нагрузке, отличившейся от номинальной, указанные значения добавочных потерь пересчитывают пропорционально квадрату тока статора.

Механические потери. Включают в себя потери на трение в подшипниках, щеток о контактные кольца, вращающихся частей машины о воздух и на вентиляцию. Потери на трение в подшипниках и на вентиляцию (Вт) в наиболее распространенных машинах защищенного исполнения со способом охлаждения IC01 при отсутствии радиальных каналов

$$P'_{\text{мх}} = P_{\text{тп}} + P_{\text{вен}} = 8 \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \left(\frac{D_1}{100} \right)^3; \quad (11-210)$$

при наличии радиальных каналов

$$P'_{\text{мх}} = P_{\text{тп}} + P_{\text{вен}} = 0,8(n_1 + 10) \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \left(\frac{D_1}{100} \right)^3. \quad (11-211)$$

Потери на трение щеток о контактные кольца (Вт)

$$P_{\text{тщ}} = 2,6I_{\text{пн}}D_1n_1 \cdot 10^{-6}. \quad (11-212)$$

КПД при номинальной нагрузке. Потери и КПД синхронных машин рассчитывают в последовательности, изложенной в § 9-9, с учетом следующих формул.

Суммарные магнитные потери (Вт) $P_{\text{сг}} = P_{\text{с1}} + P_{\text{з1}} + P_{\text{пов}} \quad (11-213)$

Потери на возбуждение синхронной машины при питании от дополнительной обмотки статора (Вт) $P_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 r_{\text{в}} + 2I_{\text{в}} n \quad (11-214)$

Добавочные потери в обмотке статора и стали магнитопровода при нагрузке:

для генераторов (Вт) $P_{\text{доб}} = 0,005P_{\text{н}} \quad (11-215)$

для двигателей $P_{\text{доб}} = 0,005P_{\text{н}}/\eta' \quad (11-216)$

Механические потери (Вт) $P_{\text{мх}} = P'_{\text{мх}} + P_{\text{тщ}} \quad (11-217)$

Суммарные потери (Вт) $P_{\Sigma} = P_{\text{сг}} + P_{\text{м1}} + P_{\text{доб}} + P_{\text{п}} + P_{\text{мх}} \quad (11-218)$

КПД при номинальной нагрузке (%) $\eta = [1 - P_{\Sigma}/(P_{\text{эл}} + P_{\Sigma})] \cdot 100 \quad (11-219)$

Примеры расчета машин
10. Потери и КПД

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
421	$m_{эл}$, кг	(9-259)	$7,8 \cdot 42 \cdot 9,4 \cdot 25 \cdot 160 \times$ $\times 0,97 \cdot 10^{-6} = 11,9$	—
422	$t_{элmax}$, мм	(9-128)	—	$3,14(630+2 \cdot 65)/72 =$ $= 33,14$
423	$b_{элmax}$, мм	(9-129)	—	$33,14 - 14,5 = 18,64$
424	$b_{элср}$, мм	(9-130)	—	$(13+18,64)/2 = 15,8$
425	$m_{эл}$, кг	(9-260)	—	$7,8 \cdot 72 \cdot 15,8 \cdot 65 \cdot 385 \times$ $\times 0,95 \cdot 10^{-6} = 211$
426	$P_{эл}$, Вт	(9-250)	$4,4 \cdot 1,74^2 \cdot 11,9 = 160$	—
427	$P_{эл}$, Вт	(9-251)	—	$3,0 \cdot 1,52^2 \cdot 211 = 1440$
428	$m_{сг}$, кг	(9-231)	$7,8 \cdot 3,14(406-35) \cdot 35 \times$ $\times 160 \cdot 0,97 \cdot 10^{-6} = 50$	$7,8 \cdot 3,14(850-45)45 \times$ $\times 385 \cdot 0,95 \cdot 10^{-6} = 325$
429	$P_{сг}$, Вт	(9-254)	$4,4 \cdot 1,61^2 \cdot 50 = 570$	—
430	$P_{сг}$, Вт	(9-255)	—	$3 \cdot 1,5^2 \cdot 325 = 2195$
431	B_0 , Тл	(11-206)	$0,35 \cdot 1,16 \cdot 0,73 = 0,3$	$0,35 \cdot 1,32 \cdot 0,78 = 0,36$
432	$P_{шв}$, Вт/м ²	(11-207)	$1,8(42 \cdot 1500 \cdot 10^{-4})^{1,5} \times$ $\times (0,1 \cdot 0,3 \cdot 21,4)^2 = 12$	$6(10 \cdot 4,72 \cdot 750)^{1,5} \times$ $\times (0,1 \cdot 0,36 \cdot 27,5)^2 =$ $= 73,8$
433	$P_{шп}$, Вт	(11-208)	$2 \cdot 2 \cdot 224,5 \cdot 0,66 \times 170 \times$ $\times 12 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 1,2$	$2 \cdot 4 \cdot 247,3 \cdot 0,66 \cdot 460 \times$ $\times 73,8 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} = 26,6$
434	$P_{сг}$, Вт	(11-213)	$570 + 160 + 1,2 = 731$	$2195 + 1440 + 26,6 = 3660$
435	$P_{мг}$, Вт	(11-209)	$3 \cdot 54,1^2 \cdot 0,118 \cdot 1,38 +$ $\times 3(17,9/\sqrt{3})^2 \cdot 0,006 \times$ $\times 1,38 = 1433$	$3 \cdot 45,5^2 \cdot 1,099 \cdot 1,38 +$ $+ 3(195/\sqrt{3})^2 \cdot 0,0023 \times$ $\times 1,38 = 9540$
436	$P_{ш}$, Вт	(11-214)	$17,9^2 \cdot 1,367 \cdot 1,38 + 2 \times$ $\times 17,9 = 640$	$19,6^2 \cdot 0,154 \cdot 1,38 + 2 \times$ $\times 196 = 8560$
437	$P_{доб}$, Вт	(11-215)	$0,005 \cdot 30 \cdot 10^3 = 150$	—
438	$P_{доб}$, Вт	(11-216)	—	$0,005 \cdot 400 \cdot 10^3 / 0,94 =$ $= 2130$
439	$P'_{мг}$, Вт	(11-210)	$8(1500 \cdot 10^{-3})^2 \times (286 \times$ $\times 10^{-3})^2 = 420$	—
440	$P'_{мг}$, Вт	(11-211)	—	$0,8(7+10)(750 \cdot 10^{-3})^2 \times$ $\times (630 \cdot 10^{-3})^2 = 1910$
441	$P_{г.ш}$, Вт	(11-212)	$2,6 \cdot 17,9 \cdot 286 \cdot 1500 \times$ $\times 10^{-6} = 20$	$2,6 \cdot 195 \cdot 630 \cdot 750 \cdot 10^{-6} =$ $= 240$
442	$P_{мг}$, Вт	(11-217)	$420 + 20 = 440$	$1910 + 240 = 2150$
443	$P_{ш}$, Вт	(11-218)	$731 + 1433 + 150 + 640 +$ $+ 440 = 3400$	$3660 + 9540 + 2130 +$ $+ 8560 + 2150 = 26\ 000$
444	η , %	(11-219)	$(1 - \frac{3400}{30 \cdot 10^3 + 3400}) \times$ $\times 100 = 89,8$	$(1 - \frac{26\ 000}{400 \cdot 10^3 + 26\ 000}) \times$ $\times 100 = 93,9$

§ 11-12. Характеристики машин

Изменение напряжения генератора. Повышение напряжения на зажимах генератора при переходе от режима с номинальной нагрузкой к х. х. при неизменных значениях тока возбуждения и частоты вращения выражают в процентах номинального напряжения:

$$\Delta U_{10}^{\%} = \frac{U_{10} - U_{1н}}{U_{1н}} 100^{\%}. \quad (11-220)$$

Значение $\Delta U_{10} \doteq E_0$ определяют по характеристике х. х. при номинальном значении МДС $F_{п.н}$ обмотки возбуждения, а $F_{п.н}$ — с помощью векторной диаграммы Blondеля.

Изменение напряжения синхронных явнополюсных генераторов мощностью до 1000 кВт в соответствии с ГОСТ 22407—77 не должно превышать 30%.

Регулировочные характеристики генератора. Для построения регулировочных характеристик, выражающих зависимость $I_n = f(I_1)$ при $U_1 = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$, задаются значениями тока статора от 0 до $1,2I_{1н}$ и с помощью векторной диаграммы определяют соответствующие токи возбуждения.

Внешние характеристики генератора. Эти характеристики, выражающие зависимость $U_1 = f(I_1)$ при $I_n = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$, могут быть построены с помощью регулировочных характеристик. В частности, для построения внешней характеристики при $I_{п.н} = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$ две крайние точки, соответствующие $U_{1н}$ при $I_1 = I_{1н}$ и U_0 при $I_1 = 0$, уже известны из предыдущих расчетов. Промежуточные точки находят по регулировочным характеристикам, построенным для значений напряжения $U_{1н} < U < U_0$.

U-образные характеристики. Эти характеристики, выражающие зависимость $I_1 = f(I_n)$ при постоянной мощности, могут быть определены при построении ряда векторных диаграмм Blondеля при $U = 1,0 = \text{const}$ и $I_1 \cos \varphi = \text{const}$, из которых для каждого значения тока I_1 определяют ток возбуждения I_n .

Угловые характеристики и статическая перегружаемость. Угловые характеристики синхронных машин выражают зависимость активной мощности от угла нагрузки θ при $U_1 = 1$ и $E_0 = \text{const}$. Под *углом нагрузки* θ понимают угол между магнитной осью полюса и осью результирующего магнитного поля статора или между векторами ЭДС E_0 и напряжения U_1 . Приближенно, принимая параметры синхронной машины постоянными, угловую характеристику можно построить, задаваясь значениями угла $\theta = 0 \div \pi$ при $U_1 = 1$ по уравнению

$$P_* = \frac{E'_{0*}}{x_{d*}} \sin \theta + 0,5 \left(\frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \sin 2\theta. \quad (11-221)$$

При этом ЭДС E'_{0*} определяют по продолжению прямолинейной части характеристики х. х. при токе возбуждения $I_{п.н*}$ (МДС $F_{п.н}$), соответствующем номинальной нагрузке машины.

По угловой характеристике определяют статическую перегружаемость синхронной машины. Под статической перегружаемостью понимают отношение максимального вращающего момента к номинальному. В соответствии с ГОСТ 183—74 этот показатель для синхронных двигателей при $\cos \varphi_n = 0,9$ должен быть не менее 1,65.

Если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора и насыщением машины, что представляется допустимым для рассматриваемых синхронных машин, то статическую перегружаемость можно определить, пользуясь соотношениями

$$S = P_{\max} / P_{\text{н}} = M_{\max} / M_{\text{н}} \quad (11-222)$$

или $S = E'_{00*} k_p / x_{d*} \cos \varphi_n \quad (11-223)$

где $E'_{00*} = E'_{0*} I_{\text{н.н}*} \quad (11-224)$

k_p — коэффициент, учитывающий влияние реактивной мощности, связанной с различием индуктивных сопротивлений x_d и x_q ; в зависимости от ε он имеет следующие значения:

ε , о. е.	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
k_p	1,0	1,02	1,02	1,04	1,07	1,10	1,14	1,17

При этом

$$\varepsilon = (x_{d*} - x_{q*}) / (E'_{00*} x_{q*}) \quad (11-225)$$

Рабочие характеристики двигателей. Характеристики, выражающие зависимость P_{1*} , I_{1*} , $\cos \varphi$, η и M_* от полезной мощности P_2 при $U_{1*} = 1 = \text{const}$ и $I_{\text{н.н}*} = \text{const}$, можно получить, пользуясь U-образными характеристиками, построенными для ряда значений мощности P_{1*} , из которых при $I_{\text{н}} = I_{\text{н.н}}$ находят значения тока I_1 , а затем определяют $\cos \varphi = P_1 / (m_1 U_1 I_1)$; $P_2 = P_1 - P_{\Sigma}$; $\eta = P_2 / P_1$; $M = P_2 / \Omega_1$. Здесь P_{Σ} — суммарные потери в машине в рассматриваемом режиме работы; $\Omega_1 = 2\pi n / 60$.

Отношение короткого замыкания. Важным показателем свойств синхронной машины является отношение короткого замыкания (ОКЗ), представляющее собой отношение тока возбуждения $I_{\text{по}}$, соответствующего номинальному напряжению при х. х., к току возбуждения $I_{\text{п.к}}$, соответствующему номинальному току статора при его к. з., т. е.

$$\text{ОКЗ} = I_{\text{по}} / I_{\text{п.к}} \quad (11-226)$$

ОКЗ современных явнополюсных синхронных машин мощностью до 1000 кВт находится в пределах 0,45—0,85.

Увеличение воздушного зазора приводит к повышению ОКЗ и устойчивости работы синхронной машины при колебаниях нагрузки, но вместе с тем ведет к росту ее массы и снижению использования активных материалов.

Значение ОКЗ может быть определено по формуле

$$\text{ОКЗ} = E'_{0*} / x_{d*} \quad (11-227)$$

Значение E'_{0*} (о. е.) определяют по прямолинейной характеристике, совпадающей с начальной прямолинейной частью характеристики х. х. при $I_{\text{по}} = 1$; x_{d*} — ненасыщенное значение синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси (о. е.).

Токи короткого замыкания. Показателями, характеризующими работу синхронной машины в аварийных ситуациях при к. з., являются кратность тока к. з. при номинальном возбуждении и ударный ток к. з. Их используют при расчетах теплового и механического воздействия токов к. з. на обмотки статора и другие элементы конструкции синхронных машин.

Кратность установившегося тока к. з. определяется соотношением

$$I_k/I_{1n} = OK3 I_{п.н*} \quad (11-228)$$

Наибольшее мгновенное значение тока трехфазного короткого замыкания на выводах машины при напряжении х. х. $U_1 = 1,05 U_{1n}$ называется ударным

$$i_{уд*} = I_{уд}/(\sqrt{2} I_{1n}) \approx 1,89/x_{d*}' \quad (11-229)$$

Здесь $I_{п.н*}$ и x_{d*}' — выражены в относительных единицах, при этом $I_{п.н*} = F_{п.н*}$.

Пусковые характеристики двигателей. Пусковые свойства синхронного двигателя характеризуются начальным пусковым моментом (при $s=1$), входным моментом (при $s=0,05$) и начальным пусковым током статора. Эти показатели зависят от выбора конструктивных параметров и материала пусковой клетки. Увеличение сопротивлений пусковой клетки путем замены меди латунью приводит к повышению начального пускового момента и некоторому снижению входного момента.

В соответствии с ГОСТ 18200—79E синхронные двигатели должны допускать прямой асинхронный пуск при номинальном напряжении сети. При этом отношение начального пускового момента к номинальному не должно быть меньше 0,8, а отношение начального пускового тока к номинальному не должно превышать 7,0.

Точный расчет пусковых характеристик связан со значительными трудностями, поэтому на практике применяют упрощенные методы, позволяющие получить приемлемые по точности результаты. Расчеты выполняют в относительных единицах с использованием комплексных чисел (для упрощения «звездочка» в формулах обычно применяемая для обозначения относительных величин, опущена).

Пусковые характеристики явнополюсных синхронных двигателей рассчитывают в такой последовательности (для значений скольжения $s=1,0$ и $s=0,05$).

Приведенное сопротивление обмотки возбуждения (о. е.) $r'_{пс} = r_{п*}(1+k_r)/s \quad (11-230)$

Приведенное сопротивление демпферной обмотки: по продольной оси (о. е.) $r_{дс} = r_{дd}/s \quad (11-231)$

по поперечной оси $r_{дс} = r_{дq}/s \quad (11-232)$

Проводимость обмотки статора по продольной оси (о. е.) $Y_{ад} = -j \frac{1}{x_{ад}} = -jb_{ад} \quad (11-233)$

Приведенная проводимость обмотки возбуждения (о. е.)

$$Y_{nc} = \frac{r'_{nc} - jx_{nc}}{r'^2_{nc} + x^2_{nc}} = g_{nc} - jb_{nc} \quad (11-234)$$

Приведенная проводимость успокоительной (пусковой) обмотки по продольной оси (о. е.)

$$Y_{ndc} = \frac{r_{ndc} - jx_{ndc}}{r^2_{ndc} + x^2_{ndc}} = g_{ndc} - jb_{ndc} \quad (11-235)$$

Полная приведенная проводимость по продольной оси (о. е.)

$$Y'_{dc} = Y_{sd} + Y_{nc} + Y_{ndc} = g_{dc} - jb_{dc} \quad (11-236)$$

Полное приведенное сопротивление по продольной оси (о. е.)

$$z_{dc} = jx_s + \frac{g_{dc} + jb_{dc}}{g'^2_{dc} + b'^2_{dc}} = r_{dc} + jx_{dc} \quad (11-237)$$

Проводимость обмотки статора по поперечной оси (о. е.)

$$Y_{aq} = -j \frac{1}{x_{aq}} = -jb_{aq} \quad (11-238)$$

Приведенная проводимость пусковой обмотки по поперечной оси (о. е.)

$$Y_{nqc} = \frac{r_{nqc} - jx_{nqc}}{r^2_{nqc} + x^2_{nqc}} = g_{qc} - jb_{qc} \quad (11-239)$$

Полная приведенная проводимость по поперечной оси (о. е.)

$$Y_{qc} = Y_{aq} + Y_{nqc} = g'_{qc} - jb'_{qc} \quad (11-240)$$

Полное приведенное сопротивление по поперечной оси (о. е.)

$$Z_{qc} = jx_s + \frac{g'_{qc} + jb'_{qc}}{(g'_{qc})^2 + (b'_{qc})^2} = r_{qc} + jx_{qc} \quad (11-241)$$

Пусковой ток статора: прямого следования (о. е.)

$$I' = \frac{U}{2} \left(\frac{r_{dc} - jx_{dc}}{r^2_{dc} + x^2_{dc}} + \frac{r_{qc} - jx_{qc}}{r^2_{qc} + x^2_{qc}} \right) = \frac{U}{2} [(g_{dc} + g_{qc}) - j(b_{dc} + b_{qc})] \quad (11-242)$$

обратного следования

$$I'' = \frac{U}{2} \left(\frac{r_{qc} - jx_{qc}}{r^2_{qc} + x^2_{qc}} - \frac{r_{dc} - jx_{dc}}{r^2_{dc} + x^2_{dc}} \right) = \frac{U}{2} [(g_{qc} - g_{dc}) - j(b_{qc} - b_{dc})] \quad (11-243)$$

Полный пусковой ток статора (о. е.)

$$I_{\text{пуск}} = \sqrt{(I')^2 + (I'')^2} \quad (11-244)$$

Активная составляющая пускового тока статора прямого следования (о. е.)

$$I'_{1a} = \frac{U}{2} (g_{dc} + g_{qc}) \quad (11-245)$$

Пусковой момент (о. е.)

$$M_{\text{пуск}} = UI'_{1a} \frac{1}{\cos \psi_H} \quad (11-246)$$

Здесь $k_r = 8+15$ — отношение добавочного сопротивления цепи возбуждения к сопротивлению обмотки возбуждения при пуске.

Примеры расчета машин
11. Характеристики машин

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
445	$\Delta U_n, \%$	(11-220)	$\frac{1,2-1,0}{1,0} 100=20$	—
446	ОКЗ, о. е.	(11-227)	$1,13 \cdot 2,868=0,4$	$1,12/2,129=0,53$
447	$I_k/I_{нн},$ о. е.	(11-228)	$0,4 \cdot 3,8=1,52$	$0,53 \cdot 2,98=1,58$
448	$t_{уд*},$ о. е.	(11-229)	$1,89/0,36=5,3$	$1,89/0,233=8,1$
449	$E'_{оо*},$ о. е.	(11-224)	$1,13 \cdot 3,8=4,29$	$1,12 \cdot 2,98=3,34$
450	ϵ	(11-225)	$\frac{2,868-1,198}{4,29 \cdot 1,198}=0,32$	$\frac{2,129-1,129}{3,34 \cdot 1,129}=0,26$
451	$s,$ о. е.	(11-223)	$\frac{4,29 \cdot 1,045}{2,808 \cdot 0,8}=1,95$	$\frac{3,34 \cdot 1,03}{2,129 \cdot 0,9}=1,8$

Угловые характеристики

452	$E'_{оо*},$ о. е.	рис. 11-15, а	4,2	—
453	$E'_{оо*},$ о. е.	рис. 11-15, б	—	3,34
454	$P_{*},$ о. е.	(11-221)	$\frac{4,2}{2,868} \sin \theta + 0,5 \times$ $\times \left(\frac{1}{1,198} - \frac{1}{2,868} \right) \times$ $\times \sin 2\theta = 1,46 \sin \theta +$ $+ 0,24 \sin 2\theta$	$\frac{3,34}{2,129} \sin \theta + 0,5 \times$ $\times \left(\frac{1}{1,129} - \frac{1}{2,129} \right) \times$ $\times \sin 2\theta = 1,57 \sin \theta +$ $+ 0,2 \sin 2\theta$

По уравнениям (11-211) построены угловые характеристики, приведенные на рис. 11-24.

Пусковые характеристики при $s=1$

455	$r'_{нс*},$ о. е.	(11-230)	—	$0,006(1+14)/1=0,09$
456	$r_{ддс*},$ о. е.	(11-231)	—	$0,058/1=0,058$
457	$r_{дс*},$ о. е.	(11-232)	—	$0,051/1=0,051$

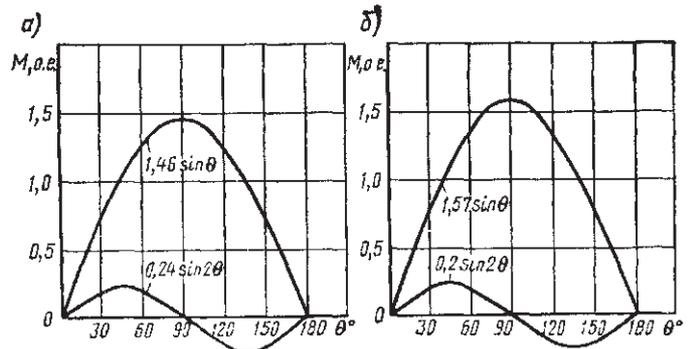


Рис. 11-24. Угловые характеристики генератора (а) и двигателя (б) к примерам расчета

Продолжение

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
458	Y_{ad} , о. е.	(11-233)	—	$-j \frac{1}{1,97} = -j0,51$
459	Y_{dc} , о. е.	(11-234)	—	$\frac{0,09 - j0,4}{0,09^2 + 0,4^2} =$ $= 0,535 - j2,38$
460	Y_{dsc} , о. е.	(11-235)	—	$\frac{0,058 - j0,096}{0,058^2 + 0,096^2} =$ $= 4,61 - j7,63$
461	Y'_{dc} , о. е.	(11-236)	—	$-j0,51 + 0,535 - j2,38 +$ $+ 4,61 - j7,63 =$ $= 5,145 - j10,52$
462	z_{dc} , о. е.	(11-237)	—	$j0,159 + \frac{5,145 - j10,52}{5,145^2 + 10,52^2} =$ $= 0,037 + j0,082$
463	Y_{aq} , о. е.	(11-238)	—	$-j \frac{1}{0,9} = -j1,11$
464	Y_{dqc} , о. е.	(11-239)	—	$\frac{0,051 - j0,039}{0,051^2 + 0,039^2} =$ $= 12,14 - j9,28$
465	Y''_{qc} , о. е.	(11-240)	—	$-j1,11 + 12,14 - j9,28 =$ $= 12,14 - j10,39$
466	z_{qc} , о. е.	(11-241)	—	$j0,159 + \frac{12,14 - j10,39}{12,14^2 + 10,39^2} =$ $= 0,047 + j0,12$
467	I' , о. е.	(11-242)	—	$\frac{1}{2} \left(\frac{0,037 + j0,082}{0,037^2 + 0,082^2} + \frac{0,047 + j0,12}{0,047^2 + 0,12^2} \right) =$ $= 1,15 + j6,14$
468	I'' , о. е.	(11-243)	—	$\frac{1}{2} \left(\frac{0,037 + j0,082}{0,037^2 + 0,082^2} - \frac{0,047 + j0,12}{0,047^2 + 0,12^2} \right) =$ $= 0,12 + j1,98$
469	$I_{пуск}$, о. е.	(11-244)	—	$\sqrt{(1,15 + j6,14)^2 + (0,12 + j1,98)^2} = 6,54$
470	I'_{1a} , о. е.	(11-245)	—	1,15
471	$M_{пуск}$, о. е.	(11-246)	—	$1 \cdot 1,15 / 0,9 = 1,27$

Аналогично рассчитывают пусковые характеристики для $s = 0,05$

§ 11-13. Тепловой и вентиляционный расчеты

Тепловой расчет синхронных машин. Расчет проводим по упрощенной методике, изложенной в § 5-3. Конструктивное подобие статора синхронных и асинхронных машин позволяет при тепловом расчете обмотки статора воспользоваться указаниями и методикой, изложенными в § 9-13, кроме формулы (9-378), которая позволяет определить потери в обмотке статора при максимальной допустимой температуре, но без учета дополнительной обмотки. Потери в основной и дополнительной обмотках статора (Вт)

$$P'_{м1} = m_1 m'_r [I_1'^2 r_1 + (I_{п.н}/\sqrt{3})^2 r_d]. \quad (11-247)$$

Следует также иметь в виду, что расчет потерь в обмотке ротора следует производить по (11-214), а потерями в демпферной обмотке, возникающими в результате пульсаций магнитного потока, а также при переходных режимах, можно пренебречь.

Тепловой расчет обмотки возбуждения производят аналогично тепловому расчету обмотки возбуждения добавочных полюсов машин постоянного тока в такой последовательности.

Условная поверхность охлаждения многослойных катушек из изолированных проводов (мм²) $S_{п2} = 2p l_{ср.п} l_{п2} \quad (11-248)$

То же, однослойных катушек обмотки из неизолированных проводов, намотанных на ребро (мм²) $S_{п2} = 2p l_{ср.п} h_k \quad (11-249)$

Удельный тепловой поток от потерь в обмотке, отнесенных к поверхности охлаждения обмотки (Вт/мм²) $p_{п2} = k P_{п2} / S_{п2} \quad (11-250)$

Превышение температуры наружной поверхности охлаждения обмотки (°С) $\Delta t_{п.п} = p_{п2} / \alpha_r \quad (11-251)$

Перепад температуры в наружной и внутренней изоляции многослойных катушек из изолированных проводов (°С) $\Delta t_{п.п} = P_{п2} \frac{b_{п.п}}{\lambda_{экв}} \quad (11-252)$

Среднее превышение температуры обмотки: над температурой воздуха внутри машины (°С) $\Delta t_{п2} = \Delta t'_{п2} + \Delta t_{п.п} \quad (11-253)$

над температурой наружного охлаждающего воздуха (°С) $\Delta t_{п2} = \Delta t'_{п2} + \Delta t'_b \quad (11-254)$

Здесь $l_{п2}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки, мм; h_k — высота однослойной катушки, мм, $b_{п.п}$ — ширина катушки, значение которой определяют из эскиза размещения обмоток в междуполосном окне, мм; k — из § 10-16; α_r — коэффициент теплоотдачи катушки:

Конструкция полюсной катушки однослойная многослойная
 Зависимость $\alpha_r = f(v_2)$, Вт/(мм²·°С) $\alpha_r = (3,0 + 0,42v_2) \times 10^{-5}$ $\alpha_r = (2,6 + 0,19v_2) \times 10^{-5}$

$b_{п.п} \approx 0,2$ мм — односторонняя толщина изоляции катушки; $\lambda_{экв} = 16 \times 10^{-5}$ Вт/(мм²·°С) — эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции (включая воздушные прослойки).

Среднее превышение температуры обмоток не должно быть больше допустимых значений для принятого класса нагревостойкости изоляционных материалов синхронной машины.

Вентиляционный расчет. Синхронные машины рассчитывают в соответствии с соображениями, изложенными в § 5-3. Эти машины выполняют самовентилируемыми при $h \leq 315$ мм — с аксиальной, а при $h > 315$ мм — с радиальной системой вентиляции.

В машинах небольшой мощности вентилятор насаживают непосредственно на вал, а при больших мощностях вентилярующие лопасти крепятся к ротору.

При аксиальной системе вентиляции с центробежным вентилятором расчет производят, как для машин постоянного тока. При этом значения эквивалентного аэродинамического сопротивления воздухопровода z_1 приведены ниже:

P_1/n_1 , Вт/об/мин	3	5	10	25	100	250	1000	2×10^3	5×10^3	1×10^4
z_1 , Па·с ² /м	3000	1750	1100	500	150	80	25	10	4,5	2,3

В (10-382), (10-383) и (10-384) следует вместо D_1 подставлять значение наружного диаметра сердечника статора $D_{н1}$.

Расчет при радиальной системе вентиляции производят, как для асинхронных двигателей.

Примеры расчета машин

12. Тепловой и вентиляционный расчеты

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Синхронный генератор	Синхронный двигатель
----------------------------	----------------------	----------	----------------------	----------------------

Тепловые расчеты

Обмотка статора

472	$P_{м1}$, Вт	(11-247)	$3 \cdot 1,48[54,1^2 \cdot 0,118 + (17,9/\sqrt{3})^2 \cdot 0,006] = 1535$	$3 \cdot 1,48[45,5^2 \cdot 1,099 + (196/\sqrt{3})^2 \cdot 0,0042] = 10390$
473	$P_{н1}$, Вт	(11-214)	$17,9^2 \cdot 1,367 \cdot 1,48 + 2 \times 17,9 = 684$	$196^2 \cdot 0,154 \cdot 1,48 + 2 \times 196 = 9240$
474	$S_{ш1}$, мм ³	(9-379)	$3,14 \cdot 286 \cdot 160 = 1,44 \cdot 10^5$	$3,14 \cdot 630 \cdot 385 = 7,62 \cdot 10^5$
475	Π_1 , мм	(9-381)	$2,25 + 12,7 + 15,7 = 78,4$	—
476	Π_1 , мм	(9-381)	—	$2(65 + 14,5) = 159$
477	$S_{мц1}$, мм ³	(9-382)	$42 \cdot 78,4 \cdot 160 = 5,27 \cdot 10^5$	$72 \cdot 159 \cdot 445 = 50,94 \cdot 10^5$
478	$S_{л1}$, мм ³	(9-383)	$4 \cdot 3,14 \cdot 286 \cdot 88 = 3,16 \cdot 10^5$	$4 \cdot 3,14 \cdot 630 \cdot 162 = 12,82 \cdot 10^5$
479	$S_{маш1}$, мм ³	(9-384)	$3,14 \cdot 406(160 + 2 \cdot 88) = 4,26 \cdot 10^5$	$3,14 \cdot 850(445 + 2 \cdot 162) = 20,3 \cdot 10^5$
480	$P_{ш1}$, Вт/мм ²	(9-386)	$0,84(1535 \frac{2 \cdot 160}{890} + 606) = 6,75 \cdot 10^{-3}$	$0,78(10390 \frac{2 \cdot 445}{17760} + 7,62 \times \frac{+4297}{\times 10^5}) = 9,73 \cdot 10^{-3}$