

УДК 621.313.12

БЕСКОНТАКТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ КОМПРЕССИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР. Ч. 1. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА

Г.В. Носов

Томский политехнический университет

E-mail: nosov@el.ti.tpu.ru

Рассмотрена конструкция и принцип действия бесконтактного импульсного компрессионного генератора, состоящего из конденсаторной батареи возбуждения, электромашинного бесконтактного генератора с периодически изменяющейся индуктивностью обмотки статора и двух коммутаторов. Получены формулы для расчета размеров и параметров генератора: масса, запасаемая кинетическая энергия, механические напряжения в шихтованном вращающемся роторе. Приведены результаты расчета размеров и параметров генераторов при изменении ширины пазов, оборотов ротора и одинакового числа пар полюсов обмотки статора и ротора.

Ключевые слова:

Бесконтактный, импульсный, компрессионный, электромашинный генератор, импульс тока, электрофизическая установка, конденсаторная батарея возбуждения, паз, ротор, статор, вал, периодически изменяющаяся индуктивность обмотки статора.

Key words:

Noncontact, impulsive, compression, dynamo-electric generator, current impulse, electrophysics setting, capacitor battery of excitation, slot, rotor, stator, billow, regularly changing inductance of stator winding.

Современная импульсная техника требует использования мощных и надежных источников питания, способных работать в частотном режиме, особенно в автономных устройствах. В качестве таких источников как альтернативу ударным синхронным генераторам (генерирующим одиночные импульсы длительностью до 20 мс) можно рассматривать электромашинные генераторы с периодически изменяющейся индуктивностью рабочих обмоток. Эти генераторы получили названия *compulsator* (компульсатор) и *ARFC* (*Active rotary flux compressor*) в США и компрессионный генератор в СССР. В настоящее время для питания рельсотронов, лазеров, плазмотронов, ускорителей заряженных частиц и других мощных электрофизических установок особенно привлекательны электромашинные генераторы с периодически изменяющейся индуктивностью рабочих обмоток [1–5]. Поэтому разработка и расчет этих генераторов является актуальной задачей.

Известна конструкция компрессионного генератора [4, 5], имеющего явнополюсные ферромагнитные шихтованные ротор и статор с двумя одинаковыми обмотками, которые соединены между собой посредством скользящих контактов (контактные кольца и щетки). При вращении ротора суммарная индуктивность этих обмоток периодически пульсирует за счет того, что в одном положении ротора обмотки оказываются включенными согласно и имеют максимальную суммарную индуктивность L_{\max} , а в другом – встречно и имеют минимальную суммарную индуктивность L_{\min} . Кратность изменения индуктивности такого генератора $N=L_{\max}/L_{\min}$ достигает сотен единиц и при начальном токе (возбуждения) i_0 и начальной энергии магнитного поля генератора W_0 , когда суммарная индуктивность обмоток максимальна L_{\max} , эта кратность N определяет значительную амплитуду импульса тока $i_m \sim i_0 N$ и существенную генерируемую энергию этого импульса $W \sim W_0 N$.

Недостатком этой конструкции является наличие скользящих контактов, через которые необходимо пропустить весь импульс тока амплитудой i_m и всю генерируемую энергию W .

Известен бесконтактный компрессионный генератор [5], имеющий явнополюсный ферромагнитный шихтованный статор с обмоткой, размещенной между полюсами, и монолитный явнополюсный ротор из проводящего электрический ток материала с зубцами, число которых равно числу пар полюсов обмотки статора. При вращении ротора индуктивность обмотки статора за счет ее экранирования зубцами ротора периодически изменяется, причем в момент минимума индуктивности L_{\min} магнитный поток вытесняется в область обмотки, а в момент максимума индуктивности L_{\max} магнитный поток Φ_0 проходит значительный путь по воздуху между полюсами статора и для его создания требуется большой ток возбуждения i_0 , что обуславливает большую начальную энергию магнитного поля генератора W_0 . За счет малой величины максимальной индуктивности L_{\max} получается незначительная кратность изменения индуктивности обмотки ($N < 10$). Однако благодаря большому току возбуждения i_0 и большой величине начальной энергии W_0 получается значительная амплитуда импульса тока i_m и существенная генерируемая энергия импульса W .

Недостатками этого генератора являются большая величина тока возбуждения i_0 и значительная начальная энергия магнитного поля генератора W_0 , которые необходимо получить от внешнего источника возбуждения, например, от заряженной конденсаторной батареи.

Известен также бесконтактный компрессионный генератор [3], содержащий явнополюсный ферромагнитный шихтованный статор с обмоткой, размещенной в открытых пазах между полюсами, и расположенный на валу монолитный явнополюс-

сный ротор из проводящего электрический ток материала с зубцами, между которыми закреплены шихтованные магнитопроводы, число которых равно числу пар полюсов обмотки статора. Благодаря наличию магнитопроводов значительно уменьшается путь магнитного потока по воздуху в момент максимума индуктивности обмотки статора L_{\max} , что приводит к увеличению максимальной индуктивности обмотки статора L_{\max} , к повышению кратности изменения индуктивности N , к уменьшению тока возбуждения i_0 и к снижению начальной энергии магнитного поля генератора W_0 . В результате этот генератор имеет уменьшенный по энергии и мощности источник возбуждения при той же амплитуде импульса тока i_m и той же генерируемой энергии W .

Недостатком генератора [3] является сложность конструкции, обусловленная монолитным явнополюсным ротором сложной формы, который необходим для надежного крепления шихтованных магнитопроводов.

Задачей является упрощение конструкции бесконтактного компрессионного генератора [2].

Поставленная задача достигается тем, что так же как в генераторе [3] бесконтактный импульсный компрессионный генератор [2] содержит явнополюсный ферромагнитный шихтованный статор с обмоткой между полюсами и расположенный на валу явнополюсный ротор.

При этом ротор генератора [2] выполнен ферромагнитным шихтованным с расположенными в пазах короткозамкнутыми обмотками, охватывающими ротор вдоль его оси, причем число этих обмоток равно числу пар полюсов обмотки статора.

За счет использования более технологичного в изготовлении ротора упрощается конструкция бесконтактного импульсного компрессионного генератора [2].

Ротор изготавливается ферромагнитным и шихтованным путем штамповки из листов электротехнической стали. Короткозамкнутые обмотки ротора располагаются и закрепляются в специальных пазах, и изготавливаются монолитными из алюминиевого сплава, бронзы или меди.

На рис. 1, а, схематически изображен бесконтактный импульсный компрессионный генератор [2] при положении ротора, когда индуктивность обмотки статора максимальна, причем число короткозамкнутых обмоток ротора 5 и число пар полюсов обмотки статора 1 равно четырем ($p=4$). На рис. 1, б, указан увеличенный чертеж паза с обмоткой статора, а на рис. 2 приведена возможная схема возбуждения и питания нагрузки рассматриваемого генератора.

Бесконтактный импульсный компрессионный генератор работает следующим образом (рис. 1, 2). Внешним приводным двигателем вал — 6 и ротор — 4 раскручивается до определенного числа оборотов f в секунду. После замыкания коммутатора K_1 на обмотку статора генератора — 1 в момент максимума её индуктивности L_{\max} от источника возбуждения (заряженная до напряжения $-U_0$ конденсаторная батарея емкостью C) подается ток возбуж-

дения i_B , достигающий величины i_0 и создающий у каждой пары полюсов магнитный поток Φ_0 . Затем замыкается коммутатор K_2 и по мере поворота ротора — 4 его короткозамкнутые обмотки — 5 вытесняют магнитный поток в пазах статора — 2 и индуктивность обмотки — 1 уменьшается, ток в нагрузке i_H увеличивается до максимального значения. В результате происходит преобразование механической энергии вращающегося ротора — 4 в электромагнитную энергию импульса тока амплитудой i_m , который возрастает тем больше, чем больше кратность изменения N индуктивности обмотки — 1. При этом электромагнитная энергия W импульса тока передается в нагрузку H .

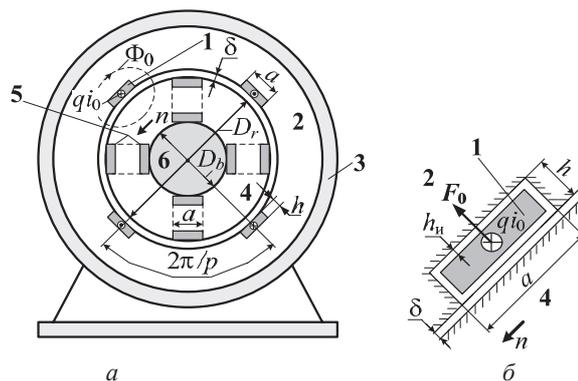


Рис. 1. Бесконтактный импульсный компрессионный генератор: 1) обмотка статора; 2) ферромагнитный шихтованный статор; 3) корпус статора; 4) ферромагнитный шихтованный ротор; 5) короткозамкнутые обмотки ротора; б) вал; а — ширина пазов обмоток статора и ротора; h — глубина паза обмотки статора; δ — воздушный зазор между ротором и статором; D_r , D_b — диаметры ротора и вала соответственно; p — число пар полюсов; n — число оборотов ротора в минуту; i_0 — ток в обмотке статора в момент максимума индуктивности; q — число последовательных проводников с током i_0 в пазу обмотки статора; Φ_0 — магнитный поток пары полюсов обмотки статора в момент максимума индуктивности; h_n — толщина изоляции обмотки статора; F_0 — сила, действующая на обмотку статора в момент максимума индуктивности

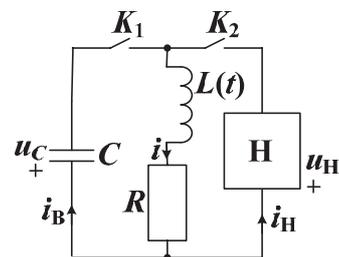


Рис. 2. Схема возбуждения и питания нагрузки бесконтактного импульсного компрессионного генератора: C — предварительно заряженная до напряжения $-U_0$ конденсаторная батарея возбуждения; $L(t)$ — периодически изменяющая индуктивность обмотки статора генератора; R — сопротивление обмотки статора; K_1 , K_2 — коммутаторы (тиристоры или механические ключи); H — нагрузка генератора; i_B , i , i_H — токи возбуждения, генератора и нагрузки соответственно; u_C , u_H — напряжения на зажимах конденсаторной батареи и нагрузки соответственно

Для определения размеров и параметров генератора (рис. 1, а, б) используем известные методики и примем следующие исходные данные и материалы [6, 7]:

- окружная скорость поверхности ротора $V_r=100$ (м/с);
- длина ротора (и статора) $l=2D_r$;
- коэффициент заполнения изолированными проволоками обмотки статора $K_z=0,7$;
- шихтованная электротехническая сталь 2411 ротора и статора с $B_0=2$ (Тл), $\mu_r=27$, $\sigma_{ст. доп}=100$ (МПа);
- медь обмоток ротора и статора с $\rho_0=8900$ (кг/м³); $C_0=385,5$ (Дж/кг·°С); $\rho_{0. доп}=191,5$ (МПа) при 150 °С; $\gamma_0=50 \cdot 10^6$ (1/Ом); $\alpha_R=0,0043$ (1/°С);
- изоляция обмотки статора из стеклотекстолита СТЭФ-1 с $\sigma_{и. доп}=294$ (МПа); $E_{пр}=20$ (МВ/м).

Диаметр ротора D_r определится заданным значением окружной скорости поверхности ротора V_r и известным числом оборотов ротора n (об/мин):

$$D_r = \frac{60V_r}{\pi n}. \quad (1)$$

Примем размер a (ширина пазов обмоток статора и ротора) в качестве переменной величины, тогда при ширине полюса

$$b(a) = \frac{\pi D_r}{2p} - a \quad (2)$$

можно записать среднюю длину пути магнитного потока $\Phi_0(a)$ пары полюсов в стали статора и ротора

$$l_{ст}(a) \approx 2a + 4b(a) + 2h(a), \quad (3)$$

внешний диаметр генератора

$$D_g(a) \approx 1,1D_r + 2[\delta + h(a) + b(a)], \quad (4)$$

диаметр вала

$$D_b(a) = D_r - 2b(a), \quad (5)$$

а также массу генератора

$$M_g(a) \approx 7800\pi l \frac{D_g(a)^2}{4}. \quad (6)$$

Далее найдем момент инерции вала и ротора [8]

$$J = 765 \cdot l \cdot D_r^4 \quad (7)$$

и их кинетическую энергию

$$W_{кин} = \frac{\pi^2 n^2 J}{1800}. \quad (8)$$

Прочность вращающегося ротора оценим по формуле для касательного механического напряжения в шихтованном роторе на его внутренней поверхности, где расположен вал [9]

$$\sigma_{ст}(a) \approx 17,64n^2[D_r^2 + 0,212D_b(a)^2] \leq \sigma_{ст. доп}. \quad (9)$$

Определим угловую частоту

$$\omega = \frac{\pi pn}{30} \quad (10)$$

и период изменения индуктивности обмотки статора

$$T = 2\pi/\omega = 60/pn, \quad (11)$$

а также эквивалентную глубину проникновения электромагнитного поля в монолитную обмотку ротора [10]

$$\Delta_0 \approx \sqrt{2/\mu_0\gamma_0\omega}. \quad (12)$$

Далее получим формулу для расчета радиального центробежного механического напряжения в зубце от монолитной обмотки ротора толщиной $3\Delta_0$, закрепленной в пазах глубиной $2\Delta_0$ и шириной равной ширине зубца [9]:

$$\sigma_{зр} = \pi^2 \frac{n^2}{225} \rho_0 \Delta_0 (D_r - 4\Delta_0) \leq \sigma_{ст. доп}. \quad (13)$$

При помощи стандартных систем компьютерной математики, например, Mathcad [11], изменяя ширину пазов статора и ротора a , а также число оборотов ротора n и число пар полюсов p , проведем расчет генератора по формулам (1–13) и результаты внесем в таблицы 1–4.

Таблица 1. Размеры и параметры бесконтактного импульсного компрессионного генератора в зависимости от ширины пазов статора и ротора a

Величины	Размерность	$n=3000$ (об/мин); $p=4$; $D_r=637$ (мм); $\delta=1,2$ (мм)				
		$a=50$ мм	$a=100$ мм	$a=125$ мм	$a=150$ мм	$a=200$ мм
$h(a)=0,1a$	мм	5	10	12,5	15	20
$b(a)$	мм	200	150	125	100	50
$D_b(a)$	мм	237	337	387	437	537
$D_g(a)$	мм	1113	1023	978	933	843
$l_{ст}(a)$	мм	910	820	775	730	640
$\sigma_{ст}(a)$	МПа	66,2	68,1	69,4	70,8	74
$M_g(a)$	кг	9657	8158	7456	6785	5539
$h(a)=0,2a$	мм	10	20	25	30	40
$b(a)$	мм	200	150	125	100	50
$D_b(a)$	мм	237	337	387	437	537
$D_g(a)$	мм	1123	1043	1003	963	883
$l_{ст}(a)$	мм	920	840	800	760	680
$\sigma_{ст}(a)$	МПа	66,2	68,1	69,4	70,8	74
$M_g(a)$	кг	9831	8480	7842	7229	6077
$h(a)=0,3a$	мм	15	30	37,5	45	60
$b(a)$	мм	200	150	125	100	50
$D_b(a)$	мм	237	337	387	437	537
$D_g(a)$	мм	1133	1063	1028	993	923
$l_{ст}(a)$	мм	930	860	825	790	720
$\sigma_{ст}(a)$	МПа	66,2	68,1	69,4	70,8	74
$M_g(a)$	кг	10010	8808	8238	7686	6640

Увеличение ширины пазов обмоток ротора и статора a приводит к уменьшению массы генератора M_g и дает возрастание касательного механического напряжения в шихтованном роторе $\sigma_{ст}$, не превышая допустимого значения $\sigma_{ст. доп}$. Возра-

Таблица 2. Размеры и параметры бесконтактного импульсного компрессионного генератора в зависимости от числа оборотов ротора n

Величины	Размерность	$p=4$			
		12000	6000	3000	1500
n	об/мин	12000	6000	3000	1500
D_r	мм	159	318	637	1273
δ	мм	0,35	0,7	1,2	3
$l=2D_r$	мм	318	637	1273	2546
$a=b=\pi D_r/4p$	мм	31	63	125	250
$h(a)=0,2a$	мм	6,25	13	25	50
$D_b(a)$	мм	97	193	387	773
$D_g(a)$	мм	251	502	1003	2007
$l_{ст}(a)$	мм	200	400	800	1600
$W_{кин}$	МДж	0,1234	0,987	7,895	63,16
$M_g(a)$	кг	122,63	981	7842	62810
$W_{кин}/M_g(a)$	Дж/кг	1006	1006	1007	1006

Таблица 3. Размеры и параметры бесконтактного импульсного компрессионного генератора в зависимости от числа пар полюсов p

Величины	Размерность	$n=3000$ (об/мин); $D_r=637$ (мм); $\delta=1,2$ (мм)			
		2	4	6	8
p	-	2	4	6	8
$a=b=\pi D_r/4p$	мм	250	125	83	63
$h(a)=0,2a$	мм	50	25	17	13
$D_b(a)$	мм	137	387	470	512
$D_g(a)$	мм	1303	1003	903	853
$l_{ст}(a)$	мм	1600	800	533	400
$W_{кин}$	МДж	7,895	7,895	7,895	7,895
$M_g(a)$	кг	13240	7842	6356	5671
$W_{кин}/M_g(a)$	Дж/кг	596,5	1007	1242	1392

стание глубины паза обмотки статора h дает увеличение массы генератора M_g . С уменьшением числа оборотов ротора n возрастают масса генератора M_g и запасаемая кинетическая энергия ротора $W_{кин}$, а удельная запасаемая энергия $W_{кин}/M_g(a)$ остается

Таблица 4. Параметры бесконтактного импульсного компрессионного генератора в зависимости от оборотов ротора n и числа пар полюсов p при $a=\pi D_r/4p$ и $h(a)=0,2a$

n	об/мин	12000			6000			3000			1500		
		2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
D_r	мм	159			318			637			1273		
δ	мм	0,35			0,7			1,2			3		
$W_{кин}$	МДж	0,12			1			7,9			63,2		
p	-	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
T	мс	2,5	1,25	0,83	5	2,5	1,7	10	5	3,33	20	10	6,7
Δ_0	мм	3,6	2,5	2	5	3,6	2,9	7,1	5	4,1	10	7,1	5,8
$\sigma_{зг}$	МПа	29	21,1	17,4	21,1	15,2	12,5	15,2	10,9	8,9	10,9	7,8	6,4
$M_g(a)$	Т	0,2	0,12	0,1	1,7	1	0,8	13,2	7,8	6,4	106	62,8	50,9
$\frac{W_{кин}}{M_g(a)}$	кДж/кг	0,6	1	1,2	0,6	1	1,2	0,6	1	1,2	0,6	1	1,2

неизменной. С увеличением числа пар полюсов p снижается масса генератора M_g , увеличивается удельная запасаемая энергия $W_{кин}/M_g$, уменьшаются ширина пазов a , их глубина h , диаметры вала D_b и генератора D_g , а кинетическая энергия $W_{кин}$ не меняется. С возрастанием числа оборотов n и уменьшением числа пар полюсов p увеличивается механическое напряжение $\sigma_{зг}$ в зубцах обмотки ротора, не превышая допустимого значения $\sigma_{ст\ доп}$.

Таким образом, по полученным формулам (1–13) можно рассчитывать размеры и параметры бесконтактных импульсных компрессионных генераторов [2].

Выводы

1. Предложен бесконтактный импульсный компрессионный генератор мощных импульсов тока для питания электрофизических установок (нагрузки) в импульсном режиме, состоящий из конденсаторной батареи возбуждения, электромашиного бесконтактного генератора с периодически изменяющейся индуктивностью обмотки статора и двух коммутаторов.
2. Получены формулы для расчета генератора, позволяющие определить размеры электромашиного генератора, массу и запасаемую кинетическую энергию, а также оценить механическую прочность вращающего ротора от действия центробежных сил.
3. На размеры и параметры генератора влияют число оборотов ротора, количество пар полюсов обмоток, ширина и глубина пазов статора, причем из них выбираются те величины, которые будут обеспечивать в нагрузке импульс тока требуемой длительности с максимальной амплитудой и наибольшей энергией при допустимом нагреве и достаточной механической прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов Г.В. Генерирование мощных импульсов тока электромашиными источниками с изменяющейся индуктивностью // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 68–70.
2. Бесконтактный импульсный компрессионный генератор: пат. на ПМ 103251. Рос. Федерация. № 2010140371/07, заявл. 01.10.10; опубл. 27.03.11, Бюл. № 9. – 4 с.: ил.
3. Бесконтактный компрессионный генератор: пат. ПМ 60807. Рос. Федерация. № 2006115046/22; заявл. 02.05.06; опубл. 27.01.07, Бюл. № 3. – 3 с.: ил.
4. Асиновский Э.И., Лебедев Е.Ф., Леонтьев А.А. и др. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / под ред. В.Е. Форгова. – М.: Наука, 2002. – 398 с.
5. Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы кратковременного и ударного действия. – Л.: Наука, 1985. – 224 с.
6. Электротехнический справочник: в 3 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.
7. Гольдберг О.Д., Гуринов Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1984. – 431 с.
8. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Наука, 1972. – 478 с.
9. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1972. – 544 с.
10. Татур Т.А. Основы теории электромагнитного поля. – М.: Высшая школа, 1989. – 271 с.
11. Дьяконов В.П. Mathcad 8/2000: Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2000. – 592 с.

Поступила 03.09.2012 г.

УДК 621.313.12

БЕСКОНТАКТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ КОМПРЕССИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР.

Ч. 2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ГЕНЕРАТОРА

Г.В. Носов

Томский политехнический университет
E-mail: nosov@elti.tpu.ru

Получены формулы для расчета параметров холостого хода и короткого замыкания, позволяющие выбрать такие бесконтактные импульсные компрессионные генераторы, которые имеют наибольшие удельные энергетические величины при допустимом нагреве и достаточной механической прочности обмотки статора и её изоляции. Разработана методика расчета импульсного возбуждения генераторов, дающая возможность определить емкость и начальное напряжение конденсаторной батареи. Толщина изоляции обмотки статора определяется предварительным значением начального напряжения конденсаторной батареи, которое зависит от числа оборотов ротора и от числа пар полюсов обмоток статора и ротора. Приведены результаты расчета параметров генераторов при изменении ширины и глубины пазов обмотки статора, оборотов ротора и числа пар полюсов. Предложенный бесконтактный импульсный компрессионный генератор мощных импульсов тока с амплитудой более 1 МА имеет достаточно высокие энергетические параметры и может использоваться для питания сильноточных электрофизических установок.

Ключевые слова:

Бесконтактный, импульсный, компрессионный, электромашиный генератор, импульс тока, конденсаторная батарея возбуждения, паз, ротор, статор, периодически изменяющаяся индуктивность обмотки статора, холостой ход, короткое замыкание.

Key words:

Noncontact, pulse, compression, electrical generator, pulse of current, excitation capacitor bank, slot, rotor, stator, regularly changing inductance of stator winding, idling, short-circuiting.

Считая по прежнему ширину пазов обмоток статора и ротора a переменной величиной, для бесконтактного импульсного компрессионного генератора [1] определим по закону полного тока [2] при максимуме индуктивности обмотки статора максимальный ток возбуждения

$$i_0(a) = \frac{B_0 [2\delta + l_{st}(a)/\mu_r]}{\mu_0 q} \tag{1}$$

Далее находим магнитный поток

$$\Phi(a) = p\Phi_0(a) = plb(a)B_0 \tag{2}$$

и из расчета магнитной цепи [2] генератора находим формулы для индуктивностей обмотки статора [1]:

- минимальная индуктивность, когда пазы ротора и статора расположены напротив друг друга

$$L_{\min}(a) \approx \frac{\mu_0 q^2 pld(a)}{a + b(a) + 0,5l_{st}(a)d(a)/\mu_r b(a)}, \tag{3}$$

где расчетный размер в области пазов ротора и статора

$$d(a) = h_n(a) + 0,333[h(a) - 2h_n(a)] + \delta + 0,5\Delta_0; \tag{4}$$

- промежуточная индуктивность, когда край паза ротора по направлению вращения от положения максимальной индуктивности за время $t_n(a)$ доходит до края паза статора