

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Н. С. БАРСЕГЯН

АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СТАТОРА ЯВНОПОЛЮСНОЙ
СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ТОКАМ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

К расчету режимов синхронных машин предъявляются все более жесткие требования в отношении точности. Достаточно точный расчет таких режимов, как пуск, несимметричная нагрузка, самосинхронизация невозможен без правильного определения частотных характеристик активных сопротивлений контуров статора и ротора*. Отсутствие достаточно мощных источников, генерирующих токи в необходимом диапазоне частот весьма затрудняет непосредственное снятие частотных характеристик на крупных гидрогенераторах. Поэтому имеющиеся данные относятся только к частоте 50 гц и не доставляют сведений о влиянии насыщения. Этот пробел может быть выполнен применительно хотя-бы к небольшим генераторам. Полученные результаты в известной степени могут быть распространены на крупные машины.

В настоящей статье приводятся данные по экспериментальному исследованию активных сопротивлений контуров статора токам различных частот на серийном генераторе с явными полюсами типа СГ—102/8, 75 квт., $\cos \varphi = 0,8$, 750 об/мин, выпускаемом Армэлектрозаводом, наиболее близко в конструктивном отношении подходящего к гидрогенераторам.

Эксперименты проводились на статоре при удаленном роторе в диапазоне частоты 5—400 гц; для учета влияния насыщения в статор подавались токи различных величин. В качестве источника питания на частоты 5—75 гц использовался синхронный генератор типа С—117/4, 100 квт, 400 в, приводимый во вращение двигателем постоянного тока, регулируемого с помощью изменения подводимого к статору напряжения и тока в шунтовой обмотке. Возбудитель на валу синхронного генератора использовался в качестве тахогенератора, что достигалось размыканием его шунтовой цепи и измерением остаточного напряжения на клеммах якоря в зависимости от числа оборотов.

Напряжение на свободных клеммах якоря измерялось с помощью вольтметра класса 0,2, а число оборотов—стробоскопом с точностью

* Здесь и в дальнейшем под частотными характеристиками подразумевается зависимость активных сопротивлений контуров статора и ротора от частоты.

до 0,05%. Точность поддержания частоты в опытах составила 0,3 гц. На частотах 100—400 гц в качестве источника питания использовался генератор повышенной частоты типа ГПЧ, 75 квт, 230 в, приводимый во вращение двигателем постоянного тока. Шунтовая цепь питалась независимо, а к статору подавалось напряжение, регулируемое в широких пределах. Выходная частота измерялась с помощью частотомера типа ИЧ—6 класса 1,5. Между источником питания и статором находился контактор, включаемый на время замеров.

Измерения проводились по схеме определения активной мощности трехфазной системы двумя ваттметрами. В опытах на все частоты (5—100 гц) применялись амперметры и вольтметры типа Э—59, малокосинусные ваттметры типа Д—542, трансформаторы тока типа УТТ—5 в диапазоне 30—400 гц, а при частотах 5—20 гц — специально рассчитанные и изготовленные трансформаторы тока. В связи с отсутствием образцовых трансформаторов тока на более низкие частоты использовались косвенные методы определения класса точности изготовленных трансформаторов, как-то: измерение чистоты синусоидальной формы кривой тока на вторичных зажимах, сравнение показаний амперметра, подключенного ко вторичным зажимам поверяемого трансформатора с показаниями амперметра класса 0,2, включенного непосредственно в первичную цепь. Для исключения нагрева на точность результатов, особенно при значениях токов, близких к номинальному, длительность замеров была максимально сокращена и составляла 7—10 сек (время, необходимое для успокоения приборов).

Надо отметить, что длительность замеров существенно влияет на точность эксперимента, и при увеличении продолжительности времени замеров, особенно при больших значениях токов (0,8—1,2) I_n , зависимость $R_{ст} = f(I)$ возрастает с увеличением тока, хотя в действительности $R_{ст}$ с увеличением тока должно уменьшаться. Это объясняется большим влиянием температуры на активное сопротивление статора, чем насыщение.

Опыт показал, что в случае сокращения продолжительности времени замеров даже при токах (1,0—1,2) I_n изменение температуры обмотки статора не наблюдалось, что проверялось по показаниям термпар, заложенных непосредственно в медь обмотки. Поэтому за температуру статора принималась температура окружающей среды.

При проведении экспериментов контролировалось отклонение формы кривых напряжения и тока от синусоидальной. В диапазоне 20—400 гц это отклонение измерялось измерителем нелинейных искажений типа С6—1.

По замеренному прибором значению

$$R_1 = \frac{1}{u_1} \sqrt{u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + \dots} \cdot 100\%$$

где u_1 — действующее значение тока или напряжения первой гармоники.

u_2, u_3, u_4 — действующие значения высших гармоник тока или напряжения.

и значению $u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots}$, измеренному вольтметром или амперметром, определялось значение первой гармоники напряжения или

$$\text{тока } u_1 = \frac{u}{\sqrt{1 + k_1^2 \cdot 10^{-4}}}.$$

В наших опытах максимальное отклонение наблюдалось при 20 гц и составляло по форме кривой напряжения 6,8—7%, а по форме кривой тока — 3,9—4%.

Подставляя эти значения в последнее выражение можно заметить, что практически значения первых гармоник напряжения и тока не отличаются от значений, измеряемых по вольтмеру и амперметру.

При частотах 5—10 гц кривые токов и напряжений осциллографировались, так как прибор С6—1 на частотах менее 20 гц не работает.

Как указывалось выше, измерение активной мощности трехфазной системы проводилось двумя ваттметрами, показания которых $P_1 = u_{AB} \cdot I_A \cos(\varphi - 30^\circ)$ и $P_2 = u_{BC} \cdot I_B \cos(\varphi - 30^\circ)$ складываются алгебраически.

В нашем случае $\cos\varphi$ меняется от 0,85 при 5 гц до 0,01 при 400 гц, соответственно φ меняется от 31° до 87° .

При φ больше 60° показания ваттметров арифметически вычитаются, и чем больше φ , тем меньше разность показаний, и больше погрешность измерений.

Как показывают расчеты при 400 гц максимально возможная погрешность достигает $\pm 10\%$, уменьшаясь с уменьшением частоты и составляет при 350—200 гц 8,7—7,8%, при 100 гц—4,3%, при 50 гц—3,8%.

На рис. 1 приводятся зависимости $R_{\text{ак}} = f(f)$ при частотах 5, 50, 100, 200, 400 гц. Из кривых следует, что при заданной частоте влияние насыщения сказывается незначительно, что объясняется открытыми пазами статора. На рис. 2 приводятся зависимости $R_{\text{ак}} = f(f)$ при $I = 0,1 I_n$ и $I = 0,5 I_n$.

Эти зависимости в диапазоне 50—400 гц, могут быть представлены прямой линией, а в диапазоне 5—50 гц — кривой сходящейся к значению $R_{\text{ак}}$ при постоянном токе.

Известно, что возрастание активного сопротивления проводника, лежащего в пазу в зависимости от частоты происходит по закону

$$\frac{R}{R_0} = \varphi(x) + n(n-1)\psi(x),$$

где

$$x = k \sqrt{\frac{a}{b}} \sqrt{\pi f}; \quad \varphi(x) = x \frac{\operatorname{sh} 2x - \sin 2x}{\operatorname{ch} 2x - \cos 2x}; \quad \psi(x) = 2x \frac{\operatorname{sh} x - \sin x}{\operatorname{ch} x - \cos x};$$

h — высота проводника; a — суммарная ширина проводника; b — ширина паза; γ — проводимость меди; μ — магнитная проницаемость меди; n — количество проводников по высоте паза; R_0 — омическое сопротивление.

В нашем случае $h = 0,145$ см, $a = 0,82$ см, $b = 1,23$ см, $n = 12$.

Тогда $x = 1,78 \cdot 10^{-2} \sqrt{f}$ при $f = 50$ гц $x = 0,126$, при $f = 400$ гц $x = 0,357$. В то же время расчеты показывают, что при изменении x ,

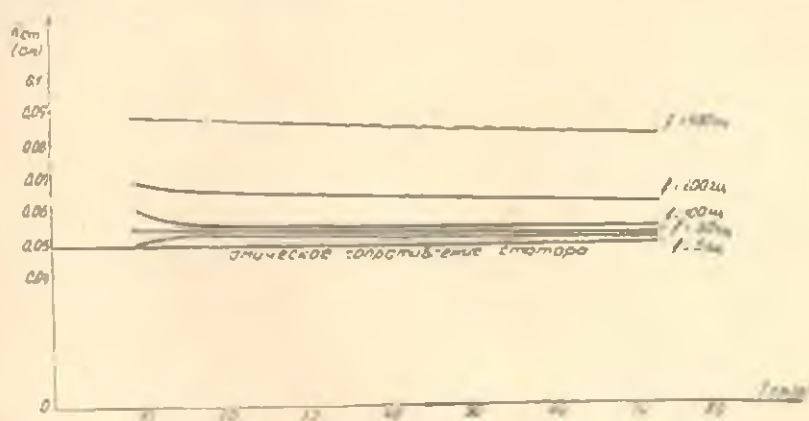


Рис. 1. Зависимость активного сопротивления статора $R_{ст} = f(I)$ при разных частотах.

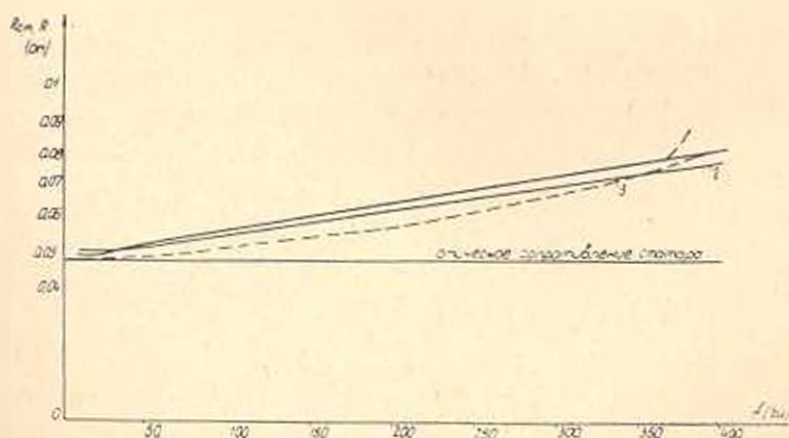


Рис. 2. Зависимость активного сопротивления статора от частоты.
1. $R_{ст} = f(I)$ при токе статора $I_{ст} = 0,1$ А; 2. $R_{ст} = f(f)$ при токе статора $I_{ст} = 0,5$ А; 3. Расчетная зависимость $R = R_0 [1 + \psi(x)] = f(f)$.

от нуля до единицы, функция $\psi(x) = 1$, что дает основание для полученных значений x в диапазоне частот 50–400 гц считать $\psi(x) = 1$; поэтому изменение активного сопротивления обмотки статора характеризуется функцией $\psi(x)$.

На рис. 2 приведена расчетная зависимость $R = R_0 [1 + \psi(x)] = f(f)$, которая достаточно близка к экспериментальной. С другой

стороны это указывает на очень малую величину потока в статоре при удаленном роторе и, соответственно, влияние потерь в стали на общее сопротивление.

Сравним данные, полученные для $R_{ст}$ при 50 гц со значениями $R_{из}$, полученными из опыта выбега при коротком замыкании, а также с действующим значением сопротивления К.З. R_3 , полученным по расчету.

$I, \text{лн } \%$	44,5	65,2	83,8	100
$R_3 (\text{о.м})$	—	—	—	0,0569
$R_{из} (\text{о.м})$	0,0598	0,0673	0,0628	0,0665
$R_{ст} (\text{о.м})$	0,0533	0,053	0,0527	0,0523

Все данные приведены для температуры окружающей среды 15°C . Из таблицы видно, что значения $R_{ст}$ и R_3 достаточно близки друг к другу. Значения $R_{из}$ несколько отличны от значений $R_{ст}$ и R_3 , что, по-видимому, можно объяснить меньшей точностью результатов опытов по самоторможению.

На основании произведенных исследований выявлено, что влияние насыщения практически не сказывается на величину активного сопротивления статора при открытых пазах статора, при токах до $I_{ном}$. Поэтому этот вывод видимо может быть распространен на крупные гидрогенераторы. Зависимость активного сопротивления от частоты переменного тока (за вычетом омического сопротивления) практически пропорциональна частоте и может быть определена расчетом по формуле, учитывающим эффект вытеснения тока в открытом пазе

$$\frac{R}{R_0} = \varphi(x) + n(n-1)\psi(x).$$

Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Поступило 6.V 1965

Կ. Ս. ԲԱՐՍԵԳՅԱՆ

ԲԱՅԱԼԱՅՏ ԲԵՐԿԵՆԵՐՈՎ ԱՐԵՆԵՐՆ ՄԵԲԵՆԱՅԻ ՄՏԱՏՈՐԻ
ԱԿՏԻՎ ԳԻՄԱԴՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ՀՈՍԱՆՔԻ ԲԱՐՁՐ ՀԱՐԲՈՆԻՆԵՐԻ ԿԿՍՄԱՄԲ

Ա. Վ Գ Ի Ռ Փ Ն Ի Վ

Այս հոդվածում բերվում են փորձարարական տվյալներ, որոնք վերաբերում են 75 կվտ կարողությամբ, մեկ րոպեում 750 պտույտ գործող բացահայտ բեկոներով ղեկնրատորի ստատորի ակտիվ դիմադրությանը՝ կախված հաճախականությունից և հազկցումից:

Փորձ 1 կատարվում հաշվարկային եղանակով որոշել ստատորի ակտիվ դիմադրությունը՝ կախված հաճախականությունից բաց փորատների դեպքում: