

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
Институт электродинамики

7
Препринт 742

А.Г. Мазуренко, И.К. Паляниченко, А.Ф. Кравчук, В.Ф. Резцов

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В АВТОНОМНОМ АСИНХРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ
ПРИ РАБОТЕ В ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Киев 1993

Энергетические соотношения в автономном асинхронном генераторе при работе в импульсных системах электроснабжения/ Мазуренко А.І. Паляниченко И.К., Кравчук А.Б., Резцов В.Ф. - Киев, 1993. - 49 с. - Препр./ АН Украины. Ин-т электродинамики; № 742/

Приведены результаты исследования энергетических характеристик автономного асинхронного генератора в импульсных системах электроснабжения. дана методика выбора оптимального режима работы генератора при периодических разрядах емкостных накопителей. Разработаны рекомендации по выбору параметров машины для импульсных систем.

Ил. 13. Список лит.: с. 47 /10 назв./

Рецензент канд. техн. наук П.Ф. Васьюк

Утверждено к печати ученым советом
Института электродинамики АН Украины

В настоящее время во многих отраслях промышленности нашли применение импульсные электрофизические процессы и устройства. Одним из мест при разработке процессов и проектировании агрегатов электрофизической обработки материалов является отсутствие источников мощных импульсов электрической энергии.

Агрегаты электроимпульсной обработки материалов создают высокие гармоники в энергосистеме предприятия, поэтому для их питания целесообразно применять автономные источники питания.

Ввиду простоты конструкции, экономичности, надежности в эксплуатации и качестве автономно работающего источника целесообразно применять асинхронную машину.

Вместе с тем энергетические процессы, имеющие место в асинхронном генераторе при работе в импульсных режимах, недостаточно изучены.

1. Энергетические характеристики автономного асинхронного генератора при работе на периодически разряжающуюся емкость

В [6] получены кривые токов и напряжений машины и их гармонические составляющие при различном соотношении параметров машины и импульсной системы в целом.

При исследовании энергетических характеристик автономного асинхронного генератора /ААГ/ при работе в импульсном режиме используем данные гармонического анализа [6].

Уравнения составляем исходя из следующих предположений и условий работы машины:

- магнитное поле в воздушном зазоре получается в результате сложения полей различных частот;
- спектр временных гармоник намагничивающих сил известен, высшие пространственные гармоники не учитываются;
- машина имеет симметричное исполнение /емкости, подключенные на каждую фазу, равны между собой и разряжаются через половину периода основной гармонической составляющей нулевой провод отсутствует/;
- форма поля определяется несинусоидальностью токов машины;

V_{ind}	V_{ind}	.	V_{ind}	0	0	.	0	0	0	.	0	V_{ind}	V_{ind}	.	V_{ind}
------------------	------------------	---	------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	------------------	------------------	---	------------------

[illegible]

— трехфазная машина приводится к эквивалентной 2-фазной с взаимно перпендикулярным расположением осей, параметры по обоим осям известны.

Поле в воздушном зазоре определяется бесконечным рядом гармоник. Поэтому считаем, что каждая из гармоник создается двумя или одной парами обмоток, расположенными на статоре и роторе по осям α и β .

Существуют общий поток, сцепленный со всеми обмотками, и потоки рассеяния, сцепленные только с одной обмоткой. Тогда для исследуемой машины в матричной форме имеем систему уравнений /1/.

Напряжения по осям α и β для генераторного режима определяются из следующих условий:

$$\begin{aligned} u_{k\alpha}^s &= u_{ск\alpha}, & u_{k\beta}^s &= u_{ск\beta}, \\ \frac{du_{ск\alpha}}{dt} &= -\frac{i_{k\alpha}^s}{C}, & \frac{du_{ск\beta}}{dt} &= -\frac{i_{к\beta}^s}{C}, \end{aligned} \quad /2/$$

где $u_{k\alpha}^s, u_{k\beta}^s$ — напряжения k -й гармоники статора по осям α и β ; $u_{ск\alpha}, u_{ск\beta}$ — напряжение на конденсаторах для k -й гармоники по соответствующим осям; $u_{1\alpha}^s, u_{1\beta}^s$ — напряжение основной гармоники статора, создаваемое полем прямой последовательности; $u_{1\alpha}^s, u_{1\beta}^s$ — напряжение основной гармоники статора, создаваемое полем обратной последовательности; $u_{2\alpha}^s, u_{2\beta}^s$ — напряжение, создаваемое полем второй гармоники с частотой $f_2 = 2f_1$, и т.д.

Такие же индексы относятся к статорным и роторным токам.

В общем случае в зависимости от схемы соединения обмоток генератора и накопителей, а также от фазы их разряда амплитуды напряжений высших гармоник могут иметь различное значение.

Если разряды производятся через промежутки времени $t > T$, T — период основной гармоники /1/, например, $t = 1,5T$, то в воздушном зазоре машины будут создаваться поля, имеющие частоту ниже основной гармоники, они будут индуцировать в обмотках статора субгармоники.

Фазы и направление вращения гармоник поля зависят от фазы разряда емкостных накопителей. В общем случае при несимметричных режимах работы системы поля высших гармоник могут быть эллиптическими и состоять из прямого и обратного полей. Это может быть, если емкости накопителей в каждой фазе имеют различные значения или же моменты разряда конденсаторов в каждой фазе

различны.

В симметричной системе активное сопротивление и полные индуктивности обмоток статора и ротора для каждой гармоники по осям α и β будут равны между собой:

$$\begin{aligned} \Gamma_{1n\alpha}^s &= \Gamma_{1n\beta}^s, & \Gamma_{10\alpha}^s &= \Gamma_{10\beta}^s & \text{и т. д.} \\ L_{1n\alpha}^s &= L_{1n\beta}^s, & L_{10\alpha}^s &= L_{10\beta}^s & \text{и т. д.} \end{aligned} \quad /3/$$

Так как каждая из гармоник в исследуемом случае создает только одно вращающееся поле / прямое - I-я и 7-я гармоники либо обратное - 5-я и 11-я гармоники /, то в данном случае каждая гармоника создастся не двумя условными парами обмоток по каждой из осей на статоре и роторе, а одной. При этом

$$\begin{aligned} \Gamma_{1\alpha}^s &= \Gamma_{1\beta}^s, & \Gamma_{1\alpha}^r &= \Gamma_{1\beta}^r, & \text{и т. д.} \\ L_{1\alpha}^s &= L_{1\beta}^s, & L_{1\alpha}^r &= L_{1\beta}^r. & \text{и т. д.} \end{aligned} \quad /4/$$

Взаимные индуктивности между одинаковыми обмотками статора и ротора соответственно равны между собой:

$$M_{m\pi\alpha}^{sr} = M_{m\pi\alpha}^{rs}, \quad M_{m\pi\beta}^{sr} = M_{m\pi\beta}^{rs}. \quad /5/$$

В случае принятых допущений в исследуемой машине взаимные индуктивности между различными контурами ротора и статора, статора и статора, ротора и ротора равны нулю:

$$\begin{aligned} M_{m\pi\alpha}^{rs} &= M_{m\pi\beta}^{rs} = 0, & \text{при } n \neq m, \\ M_{m\pi\alpha}^s &= 0, & M_{m\pi\beta}^s &= 0, \\ M_{m\pi\alpha}^r &= 0, & M_{m\pi\beta}^r &= 0. \end{aligned} \quad /6/$$

При вращении ротора условные обмотки одних и тех же частот, расположенные на статоре по оси α , связаны с обмотками на роторе по оси β , а обмотки на статоре по оси β - с обмотка-

ми на роторе по оси α . В уравнениях /1/ это учитывается членами $M_{m\alpha}^{rs} \cdot \omega_r$; $M_{m\beta}^{rs} \cdot \omega_r$ и т. д.

При определении индуктивности исходим из того, что полная индуктивность обмотки складывается из взаимной индуктивности обмоток и индуктивности рассеяния данной обмотки.

Для машины с приведенным числом витков взаимная индуктивность для всех обмоток, расположенных на одной оси, одинакова.

Результирующее поле в воздушном зазоре создается токами различных частот $f_k = k f_1$. Число пар полюсов условной обмотки, индуцирующей напряжение частоты f_k , равно $k p_1$, где p_1 — число пар полюсов обмотки, в которой индуцируется напряжение основной частоты f_1 . Следовательно, скорость вращения магнитных полей в воздушном зазоре будет одна и та же. Предполагаем, что трансформаторная связь между обмотками различных частот отсутствует, а все поля в воздушном зазоре наводят ЭДС в обмотках ротора.

Так как ротор исследуемой машины коротко замкнут, то напряжения на его обмотках равны нулю.

Допускаем, что активные сопротивления обмоток на разных частотах одинаковы, т.е. изменением активных сопротивлений, обусловленных вытеснением тока на разных частотах, пренебрегаем:

$$\Gamma_{1\alpha}^s \approx \Gamma_{2\alpha}^s \approx \Gamma_{n\alpha}^s, \quad \Gamma_{1\beta}^r \approx \Gamma_{2\beta}^r \approx \Gamma_{p\beta}^r \quad \text{и т.д.} \quad /1/$$

Индуктивности, собственные и взаимные, на различных частотах определяются выражениями

$$\begin{aligned} p L_{\alpha\alpha}^s &= p k L_{\alpha}^s, \\ p M_{k\alpha\alpha}^{sr} &= p M_{k\alpha\alpha}^{rs} = p M_{n\alpha}^{rs}, \\ p M_{k\alpha\beta}^{sr} &= p M_{k\alpha\beta}^{rs} = p k M_{n\alpha}^{rs}. \end{aligned} \quad /2/$$

Относительная скорость перемещения обмоток ротора по отношению к полю любой гармоники одинакова, так как все они перемещаются вместе с ротором с одинаковой скоростью.

Емкостные сопротивления, подключенные на каждую фазу, для каждой гармоники зависят от ее частоты.

В [6] показано, что относительное значение гармоник поля выше II-й составляет не более нескольких процентов по отношению к

[illegible]

первой гармонике. Поэтому в дифференциальных уравнениях машины гармониками выше II-й пренебрегаем, что значительно упростит анализ уравнений, а точность расчетов при этом понизится незначительно.

Итак, в фазных токах для схемы звезда-звезда без нулевого провода при разрядах через T/2 будет действовать четыре гармоники: I-я и 7-я, создающие поле прямой последовательности; 5-я и 11-я создающие поле обратной последовательности.

Система уравнений /1/, дополненная системой /2/, примет вид /9/.

Для схемы соединения звезда-звезда без нулевого провода ток генератора состоит из четырех гармоник /I-, 5-, 7- и 11-й/. Тогда система дифференциальных уравнений запишется в виде

$$\begin{aligned} r^s \sum_{k=1}^4 i_{\alpha k}^s + L^s \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^4 i_{\alpha k}^s + M \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^4 i_{\alpha k}^r - \sum_{k=1}^4 u_{\alpha k}^s &= 0, \\ r^s \sum_{k=1}^4 i_{\beta k}^s + L^s \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^4 i_{\beta k}^s + M \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^4 i_{\beta k}^r - \sum_{k=1}^4 u_{\beta k}^s &= 0, \\ r^r \sum_{k=1}^4 i_{\alpha k}^r + L^r \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^4 i_{\alpha k}^r + M \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^4 i_{\alpha k}^s - M p \omega_r \sum_{k=1}^4 i_{\beta k}^s - L^r p \omega_r \sum_{k=1}^4 i_{\beta k}^r &= 0, \\ r^r \sum_{k=1}^4 i_{\beta k}^r + L^r \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^4 i_{\beta k}^r + M \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^4 i_{\beta k}^s - M p \omega_r \sum_{k=1}^4 i_{\alpha k}^s + L^r p \omega_r \sum_{k=1}^4 i_{\alpha k}^r &= 0, \\ P_3 &= \frac{3}{2} M \sum_{k=1}^4 [\omega_k (i_{\alpha k}^r i_{\beta k}^s - i_{\beta k}^r i_{\alpha k}^s)] , \end{aligned} \quad /10/$$

где P_3 - электромагнитная мощность, развиваемая системой.

Для генераторного режима

$$u_{\alpha k}^s = \frac{1}{C} \int_0^t i_{\alpha k}^s dt ,$$

$$u_{\beta k}^s = \frac{1}{c} \int_0^t i_{\beta k}^s dt. \quad /11/$$

Эти напряжения определены ранее в [5]. Представим их в виде косинусного и синусного рядов:

$$\sum_{k=1}^4 u_{\alpha k}^s = \sum_{k=1}^4 u_{m\alpha k}^s \cos \omega_k t, \quad \sum_{k=1}^4 u_{\beta k}^s = \sum_{k=1}^4 u_{m\beta k}^s \sin \omega_k t, \quad /12/$$

где $\omega_k = k\omega_1$ - угловая частота k -й /1-,5-,7-,11-я/ гармоники.

С целью упрощения алгоритма расчета системы [4] допустим, что в исследуемой асинхронной машине собственные и взаимные индуктивности обмоток статора и ротора равны между собой. Тогда уравнения для каждой гармоники запишем в виде

$$u_{\alpha k}^s = r^s i_{\alpha k}^s + M \left(\frac{di_{\alpha k}^s}{dt} + \frac{di_{\alpha k}^r}{dt} \right),$$

$$u_{\beta k}^s = r^s i_{\beta k}^s + M \left(\frac{di_{\beta k}^s}{dt} + \frac{di_{\beta k}^r}{dt} \right), \quad /13/$$

$$0 = r^r i_{\alpha k}^r + M \left(\frac{di_{\beta k}^r}{dt} + \frac{di_{\beta k}^s}{dt} \right) + M p \omega_r i_{\beta k}^s - M p \omega_r i_{\beta k}^r,$$

$$0 = r^r i_{\beta k}^r + M \left(\frac{di_{\alpha k}^r}{dt} + \frac{di_{\alpha k}^s}{dt} \right) + M p \omega_r i_{\alpha k}^s - M p \omega_r i_{\alpha k}^r.$$

Для решения уравнений на ЭВМ целесообразно выразить производные через основные величины и произвести замену переменных:

$$i_{\alpha k} = i_{\alpha k}^s + i_{\alpha k}^r, \quad i_{\beta k} = i_{\beta k}^s + i_{\beta k}^r. \quad /14/$$

После преобразований получим:

$$\frac{di_{\alpha k}}{dt} = \frac{u_{\alpha k}^s - r^s(i_{\alpha k} - i_{\alpha k}^r)}{M},$$

$$i_{\alpha k}^r = \frac{r^s i_{\alpha k} - M p \omega_r i_{\beta k} - (u_{\alpha k}^s + u_{\alpha k}^r)}{r^s + r^r},$$

$$\frac{di_{\beta k}}{dt} = \frac{u_{\beta k}^s - r^s(i_{\beta k} - i_{\beta k}^r)}{M},$$

/15/

$$i_{\beta k}^r = \frac{r^s i_{\beta k} - M p \omega_r i_{\alpha k} - (u_{\beta k}^s + u_{\beta k}^r)}{r^s + r^r}.$$

Таким образом, в переходных режимах необходимо решить для каждой гармоники два дифференциальных, два алгебраических уравнения и одно общее уравнение движения

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left[p M \left(\sum_{k=1}^4 i_{\alpha k}^r \sum_{k=1}^4 i_{\beta k}^s - \sum_{k=1}^4 i_{\beta k}^r \sum_{k=1}^4 i_{\alpha k}^s \right) - \sum_{k=1}^4 \frac{P_k}{\omega_k} \right]. \quad /16/$$

Для установившегося режима физические процессы в АЛГ при симметричном синусоидальном напряжении обычно сводятся к уравнениям для одной фазы в символической форме [2 , 3] .

Переменные величины в этих уравнениях определены в неподвижных осях координат относительно обмотки статора. Комплексные уравнения для фаз асинхронного генератора можно получить из дифференциальных уравнений в осях α и β для частного случая, когда скорость вращения ротора постоянна. Такой же подход возможен и для случая, когда напряжения и токи в установившемся режиме изменяются во времени по несинусоидальному периодическому закону. Вначале напряжения подвергают гармоническому анализу, после чего дифференциальные уравнения для каждой гармоники записывают в символической форме. Результирующие токи и напряжения определяют в соответствии с принципом наложения, после чего рассчитывают мощность и энергетические характеристики генератора.

Учитывая изложенное, для установившегося режима вместо систе-

мы /10/ имеем

$$\begin{aligned}\sum_{k=1}^4 \dot{U}_{\alpha k}^s &= r^s \sum_{k=1}^4 \dot{I}_{\alpha k}^s + jL^s \left(\sum_{k=1}^4 \omega_k \dot{I}_{\alpha k}^s \right) + jM \left(\sum_{k=1}^4 \omega_k \dot{I}_{\alpha k}^r \right), \\ \sum_{k=1}^4 \dot{U}_{\beta k}^s &= r^s \sum_{k=1}^4 \dot{I}_{\beta k}^s + jL^s \left(\sum_{k=1}^4 \omega_k \dot{I}_{\beta k}^s \right) + jM \left(\sum_{k=1}^4 \omega_k \dot{I}_{\beta k}^r \right), \\ 0 &= r^r \sum_{k=1}^4 \dot{I}_{\alpha k}^r + jL^r \left(\sum_{k=1}^4 \omega_k \dot{I}_{\alpha k}^r \right) + jM \left(\sum_{k=1}^4 \omega_k \dot{I}_{\alpha k}^s - \right. \\ &\quad \left. - M \omega_r \left(\sum_{k=1}^4 p_k \dot{I}_{\beta k}^s \right) - L^r \omega_r \left(\sum_{k=1}^4 p_k \dot{I}_{\beta k}^r \right) \right), \\ 0 &= r^r \sum_{k=1}^4 \dot{I}_{\beta k}^r + jL^r \left(\sum_{k=1}^4 \omega_k \dot{I}_{\beta k}^r \right) + jM \left(\sum_{k=1}^4 \omega_k \dot{I}_{\beta k}^s \right) + \\ &\quad - M \omega_r \left(\sum_{k=1}^4 p_k \dot{I}_{\alpha k}^s \right) + L^r \omega_r \left(\sum_{k=1}^4 p_k \dot{I}_{\alpha k}^r \right),\end{aligned} \quad /17/$$

где $\dot{U}_{\alpha k}^s$ и $\dot{U}_{\beta k}^s$ определяются согласно /11/.

Введем принятые в классической теории асинхронных машин обозначения:

$X_{sk} = \omega_k L_{sk}$ - индуктивное сопротивление обмотки статора для k -й гармоники / $\chi_{sk} = K X_{s1}$ /;

$X_{rk} = \omega_k L_{rk}$ - то же для обмотки ротора при скольжении, равном единице;

$X_{ok} = \omega_k M$ - индуктивное сопротивление взаимной индукции между обмотками статора и ротора для k -й гармоники;

$X_{ck} = 1/\omega_k C$ - емкостное сопротивление конденсаторов, подключенных на каждую фазу для k -й гармоники;

$\omega' = p\omega_r/\omega_k$ - относительная угловая скорость вращения ротора. Тогда для каждого k находим систему уравнений

$$r^s \dot{I}_{\alpha k}^s + jX_k^s \dot{I}_{\alpha k}^s + jX_{ok} \dot{I}_{\alpha k}^s + jX_{ok} \dot{I}_{\alpha k}^r = jX_{ck} \dot{I}_{\alpha k}^s = \dot{U}_{\alpha k}^s,$$

$$r^r \dot{I}_{\beta k}^s + jX_k^s \dot{I}_{\beta k}^s + jX_{ok} \dot{I}_{\beta k}^s + jX_{ok} \dot{I}_{\beta k}^r = jX_{ck} \dot{I}_{\beta k}^s = \dot{U}_{\beta k}^s,$$

$$r^r \dot{I}_{\alpha k}^r + j x_k^r \dot{I}_{\alpha k}^r + j x_{0k} \dot{I}_{\alpha k}^r + j x_{0k} \dot{I}_{\alpha k}^s - x_{0k} \dot{I}_{\beta k}^s \omega'_k -$$

$$- (x_k^r + x_{0k}) \dot{I}_{\beta k}^r \omega'_k = 0 ,$$

/18/

$$r^r \dot{I}_{\beta k}^r + j x_k^r \dot{I}_{\beta k}^r + j x_{0k} \dot{I}_{\beta k}^r + j x_{0k} \dot{I}_{\beta k}^s - x_{0k} \dot{I}_{\alpha k}^s \omega'_k +$$

$$+ (x_k^r + x_{0k}) \dot{I}_{\alpha k}^r \omega'_k = 0 .$$

Гармонические составляющие напряжений, их активные и реактивные составляющие определяются из решения дифференциальных уравнений (26) [6] для каждого режима работы системы и угла γ :

$$U_{\alpha k a}^s = U_{\alpha k}^s \cos \phi_{s\alpha k} , \quad U_{\beta k a}^s = U_{\beta k}^s \cos \phi_{s\beta k} ,$$

$$U_{\alpha k p}^s = U_{\alpha k}^s \sin \phi_{s\alpha k} , \quad U_{\beta k p}^s = U_{\beta k}^s \sin \phi_{s\beta k} .$$

/19/

Так как

$$\dot{I}_{\beta k}^s = j \dot{I}_{\alpha k}^s , \quad \dot{I}_{\beta k}^r = j \dot{I}_{\alpha k}^r ,$$

/20/

то представляется возможным в симметричном режиме рассматривать процессы только в одной фазе машины. Подставив /19/ в /18/ для обмоток статора по оси α , получим:

$$r^s \dot{I}_{\alpha k}^s + j x_k^s \dot{I}_{\alpha k}^s + j x_{0k} (\dot{I}_{\alpha k}^s + \dot{I}_{\alpha k}^r) = j x_{sk} \dot{I}_{\alpha k}^s = \dot{U}_{\alpha k}^s ,$$

$$r^r \dot{I}_{\alpha K}^r + jx_K^r \dot{I}_{\alpha K}^r + jx_{OK} \dot{I}_{\alpha K}^r + jx_O \dot{I}_{\alpha K}^s - jx_{OK} \dot{I}_{\alpha K}^s \omega'_K -$$

$$-j(x_K^r - x_{OK}) \dot{I}_{\alpha K}^r \cdot \omega'_K = 0.$$

/21/

Упростив второе уравнение системы /21/ и перенеся верхние индексы r и s вниз, а также опустив индекс α , получим уравнения для k -й гармоники фазы генератора:

$$r_s \dot{I}_{sK} + jx_{sK} \dot{I}_{sK} + jx_{OK} \dot{I}_{sK} + jx_{OK} \dot{I}_{rK} = jx_{CK} \dot{I}_{sK} = \dot{U}_{sK}, \quad /22/$$

$$r_r \dot{I}_{rK} + jx_{rK} (1 - \omega'_K) \dot{I}_{rK} + jx_{OK} (1 - \omega'_K) \dot{I}_{rK} + jx_{OK} (1 - \omega'_K) \dot{I}_{sK} = 0.$$

Уравнения /22/ решаем относительно токов:

$$\dot{I}_{sK} = \frac{\dot{U}_{sK} [r_r + jx_{rK} (1 - \omega'_K) + jx_{OK} (1 - \omega'_K)]}{[r_r + jx_{rK} (1 - \omega'_K) + jx_{OK} (1 - \omega'_K)] (r_s + jx_{sK} + jx_{OK}) + x_{OK}^2 (1 - \omega'_K)}, \quad /23/$$

$$\dot{I}_{rK} = \frac{-jx_{OK} \dot{U}_{sK} (1 - \omega'_K)}{(r_s + jx_{sK} + jx_{OK}) [r_r + jx_{rK} (1 - \omega'_K) + jx_{OK} (1 - \omega'_K)] + x_{OK}^2 (1 - \omega'_K)}.$$

Таким образом, для каждой гармонической имеем два алгебраических уравнения.

Систему /23/ можно решать численным методом Рунге-Кутты с использованием стандартных подпрограмм. Расчеты следует производить для различных соотношений параметров машины и разных режимов работы системы, а затем в соответствии с /17/ токи и напряжения почленно суммировать. Для действующих значений напряжений и тока имеем:

$$U = \sqrt{\sum_{k=1}^4 U_k^2} = \sqrt{U_1^2 + U_5^2 + U_7^2 + U_{11}^2}, \quad /24/$$

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^4 I_k^2} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2}. \quad /25/$$

Скольжение для k -й гармонической определяется известным соотношением

$$s_k = 1 - \omega'_k.$$

Учитывая /19/, средний электромагнитный момент генератора находим по уравнению

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^4 M_{zk} = \frac{3}{2} \sum_{k=1}^4 \frac{\chi_{0k}}{\omega_k} (I_{z\alpha k\alpha} I_{r\beta k\alpha} - I_{z\alpha k\beta} I_{r\beta k\alpha} - \\ - I_{z\beta k\alpha} I_{r\alpha k\alpha} - I_{z\beta k\beta} I_{r\alpha k\beta}). \end{aligned} \quad /26/$$

Мощность, подводимую к валу ААГ, находим так:

$$\sum_{k=1}^4 P_{1k} = \omega_\Gamma \sum_{k=1}^4 M_{zk} + P_M. \quad /27/$$

Мощности фаз генератора рассчитываем по уравнениям:

- полная

/28/

$$S = \sum_{k=1}^4 U_k I_k ,$$

- активная

/29/

$$P = \sum_{k=1}^4 U_k I_k \cos \varphi_k ,$$

- реактивная

/30/

$$Q = \sum_{k=1}^4 U_k I_k \sin \varphi_k .$$

Эквивалентный активный ток и эквивалентное активное сопротивление нагрузки определяем из уравнений

/31/

$$I_{за} = \frac{P}{U} ,$$

$$r_{на} = \frac{U}{I_{за}} = \frac{U^2}{P} .$$

/32/

Эквивалентный $\cos \varphi_s$ и КПД машины рассчитываем так:

/33/

$$\cos \varphi_s = \frac{P}{UI} ,$$

/34/

$$\eta = \frac{P}{\sum_{k=1}^4 P_k} .$$

Такая методика анализа позволяет определить все характеристики системы при известных параметрах генератора и гармоническом составе напряжений. На рис. 1 приведены характеристики импульсной системы при оптимальном угле β , когда система развивает максимальную активную мощность. При других значениях углов β , имея номинальные действующие значения напряжений и токов генера-

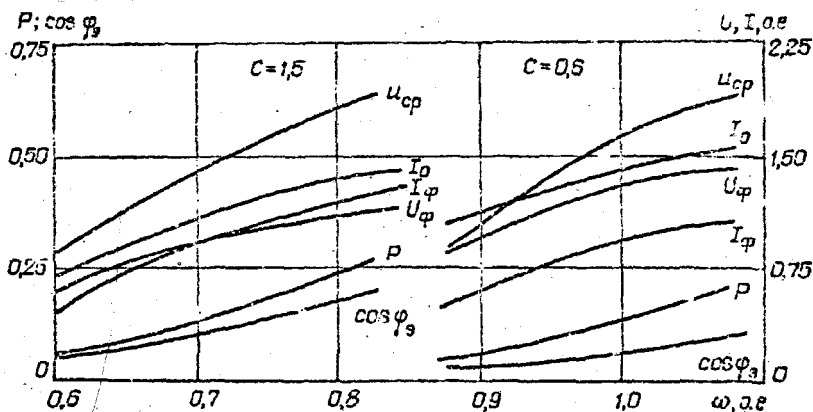


Рис. I

тора, система развивает меньшую активную мощность из-за того, что уменьшается предразрядное напряжение накопителей.

Лучшим является режим работы машины при пониженных скоростях вращения ротора и при повышенных значениях емкостей накопителей.

При номинальных скоростях вращения ротора машину не удастся вывести в номинальный режим, так как при напряжениях, значительно превышающих номинальное значение, токи не могут достичь своих номинальных величин. В связи с относительно низкими значениями емкостей накопителей активная мощность, коэффициент мощности и КДД системы малы.

На рис. 2 приведены зависимости параметров импульсной системы с ААГ от величины емкостей накопителей при постоянной скорости вращения ротора для оптимального угла разряда. Энергетические характеристики такой импульсной системы вполне удовлетворительны и имеют лучшие показатели по сравнению с системами, где использованы другие типы генераторов [1, 8].

Приведенная методика анализа трехфазной асинхронной машины при работе в импульсном режиме применима при учете небольшого числа гармоник и при отсутствии токов нулевой последовательности. Это условие выполняется в схеме звезда-звезда без нулевого провода при разрядах накопителей через $T/2$ основной гармонической напряжения.

При энергетических исследованиях в переходных режимах схемы звезда-звезда с нулевым проводом трехфазную машину нельзя привес-

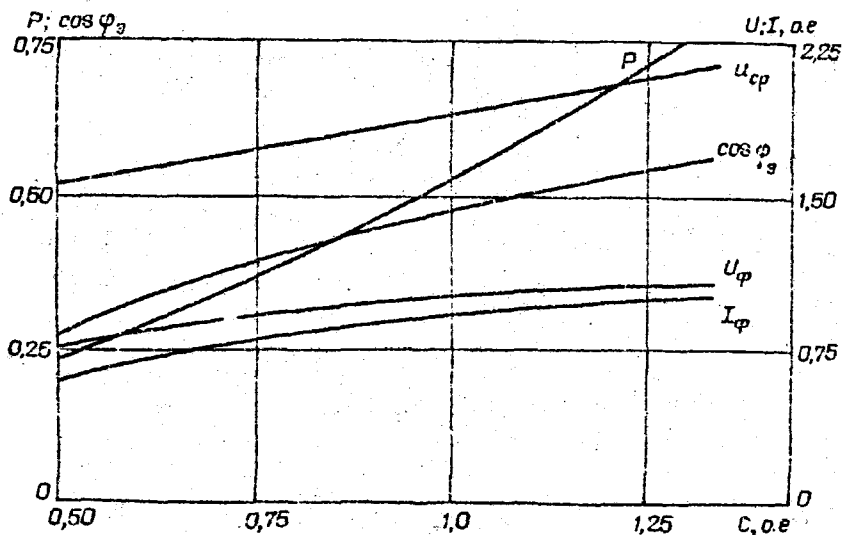


Рис. 2

ти к двухфазной из-за наличия токов нулевой последовательности. В этом случае необходимо отдельно составить уравнения для нулевой последовательности. Объем вычислительной работы при этом значительно увеличивается, так как вместо четырех гармоник для исследуемой схемы при разрядах накопителей через $T/2$ основной гармоники напряжения при желании достичь той же точности в расчетах необходимо учитывать II гармоник и постоянную составляющую. В большинстве случаев не требуется исследовать все параметры системы. Для энергетической оценки необходимо определить токи и напряжения машины и накопителей, а также развиваемую системой полезную мощность. Это можно осуществить, решив систему [27] и [29] [6] и произведя гармонический анализ токов и напряжений.

При этом для действующих значений напряжений и токов имеем:

$$U = \sqrt{U_0^2 + \sum_{k=1}^n U_k^2}, \quad /35/$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^n I_k^2} . \quad /36/$$

Активную мощность, которую генератор отдает импульсным потребителям, можно определить несколькими способами.

При решении уравнений /27/ и /29/ [6] находим напряжения на конденсаторах. Таким образом, будут известны предразрядные напряжения накопителей, их емкость и частота основной гармонической. Активная мощность системы определяется выражением

$$P = \frac{m \cdot n \cdot U_{cp}^2}{2} \cdot f_1 . \quad /37/$$

Здесь m - число фаз импульсной системы; U_{cp} - предразрядное напряжение накопителей; f_1 - частота основной волны напряжения; n - число разрядов накопителей на период.

Уравнению /37/ справедливо, если не происходит переразряда накопителей.

Если же процесс в разрядной цепи носит колебательный характер, то может наблюдаться перезаряд накопителей. В этом случае уравнение расчета активной мощности будет иметь вид

$$P = \frac{m \cdot n \cdot C}{2} \cdot f_1 (U_{cp}^2 - U_{сп}^2) , \quad /38/$$

где $U_{сп}$ - напряжение, до которого перезаряжаются накопители. Или же по известным действующим значениям напряжений и токов каждой гармоники и углом сдвига фаз между ними активную мощность, отдаваемую генератором импульсному потребителю, рассчитывают по уравнению

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \varphi_k . \quad /39/$$

Полная мощность системы определяется выражением

$$S = 3UI,$$

/40/

а эквивалентный коэффициент мощности $\cos \varphi_3$ вычисляют по формуле /33/

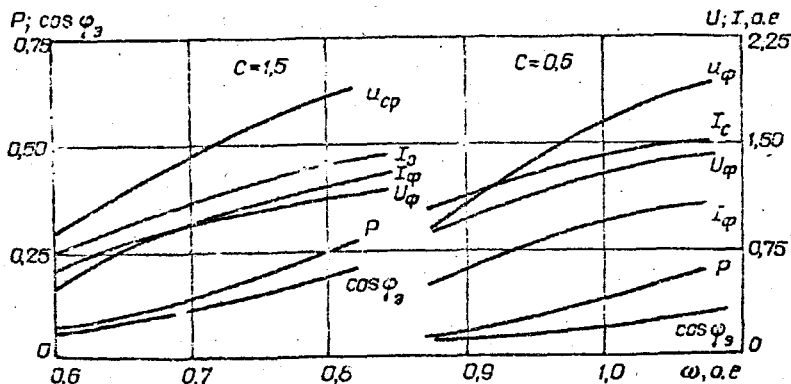


Рис. 3

На рис. 3 приведены характеристики системы с ААГ, рассчитанные для конкретной машины А02-41-4 для схемы звезда-звезда с нулевым проводом при разрядах через один период первой гармонической составляющей напряжения для двух различных значений емкости накопителей при повышенном и пониженном скоростях вращения ротора. Здесь, как и в предыдущем случае, энергетические показатели выше при работе машины на пониженных скоростях вращения ротора и при повышенных емкостях накопителей. Однако, даже в лучшем случае при номинальных токах и напряжениях машины полезная мощность системы составляет всего лишь 0,25% от габаритной мощности машины. Значительной величины достигает ток в нулевом проводе ввиду того, что третья гармоника тока имеет довольно большое значение / табл. 1, [6] /. При номинальной же скорости вращения ротора, даже в случае, когда ток и напряжение значительно превышают номинальные значения, полезная мощность системы составляет лишь 12,5 % габаритной мощности машины.

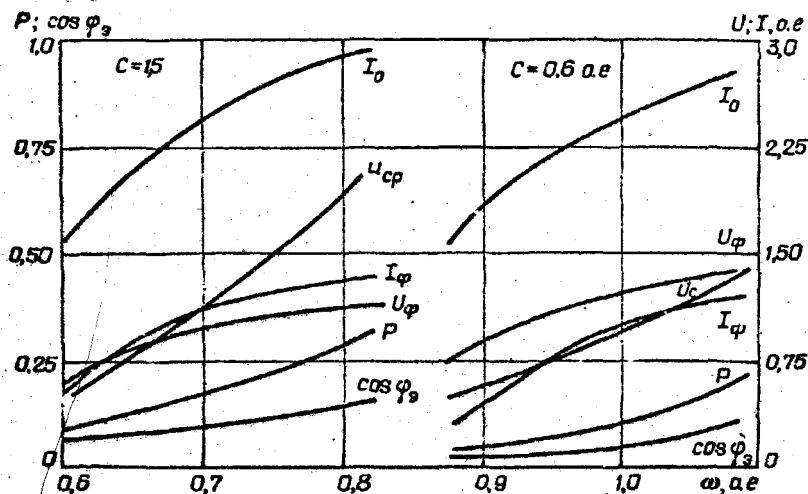


Рис. 4

На рис. 4 приведены характеристики той же системы при разрядах накопителей через $T/2$ основной гармонической напряжения при оптимальном угле разряда конденсаторов. Из анализа данных, приведенных на рис. 4, следует, что в этом случае энергетические показатели системы довольно низки. Так как 3-я гармоника тока превышает в несколько раз основную гармонику / табл. 2, [6] /, то ток в нулевом проводе в три с лишним раза превышает номинальный ток фазы. При других углах разряда / больших или меньших оптимальных / энергетические показатели системы еще хуже. Следовательно, схему соединений звезда-звезда с нулевым проводом в импульсных энергосистемах применять нецелесообразно. Чтобы можно было использовать эту схему, необходимо увеличивать сопротивление цепи для токов нулевой последовательности. Практически для этого надо в цепь нулевого провода включить дроссель, который пропускал бы постоянную составляющую и имел большое сопротивление для высших гармоник.

При исследовании схем с дросселем в нулевом проводе решаем систему уравнений [27] [6], дополненную уравнениями

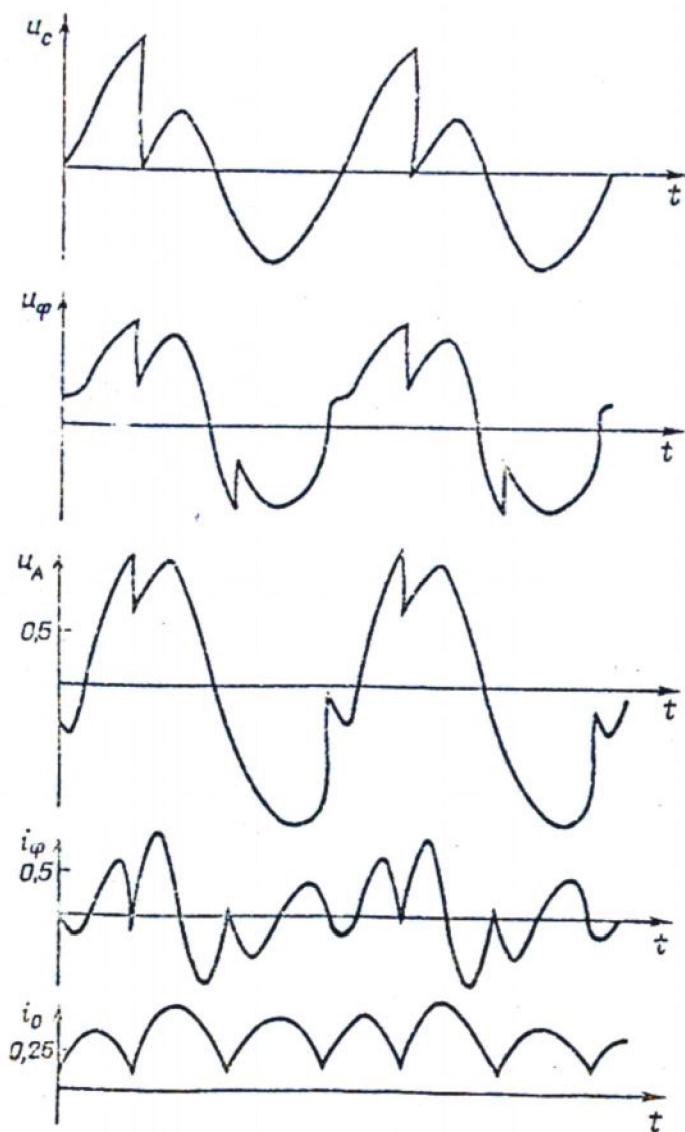


Рис. 5

$$U_{ca} + U_0 = U_{\varphi a}, \quad U_{cb} + U_0 = U_{\varphi b}, \quad U_{cc} + U_0 = U_{\varphi c}, \quad /41/$$

$$i_0 = \frac{U_0}{Z_{\partial p}}.$$

Исследования проводятся аналогично описанному выше.

На рис. 5 приведены кривые тока и напряжений АЛГ при оптимальном угле разряда конденсаторов через один период основной гармонической. Видно, что форма кривых, а следовательно, и их гармонический состав отличаются от соответствующих кривых при работе системы без дросселя в нулевом проводе / рис. 4-7 /. В момент разряда напряжения на конденсаторах значительно выше, чем в схеме без дросселя. Это существенно увеличивает полезную мощность системы. После разряда фазные напряжения возрастают незначительно. Следовательно, включение дросселя в нулевой провод приводит к понижению действующих значений напряжения и тока при тех же предразрядных напряжениях накопителей. На рис. 6 приведены основные характеристики системы с дросселем в нулевом проводе при оптимальном угле

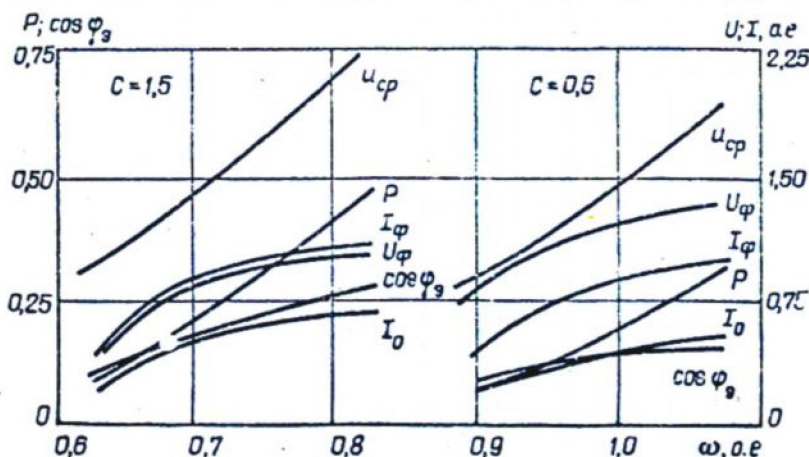


Рис. 6

разряда накопителей при номинальных и пониженных скоростях вращения ротора. В том и в другом случаях полезная мощность системы возросла. Так, при пониженных скоростях мощность достигает 0,425

габаритной мощности машины, что в 1,7 раза превышает активную мощность системы в аналогичной схеме без дросселя в нулевом проводе.

При разрядах накопителей через T/2 основной гармонической напряжения получаем схему, равноценную схеме без нулевого провода, так как в этом случае постоянная составляющая отсутствует, а высших гармонических дроссель не пропускает. Ток в нулевом проводе равен нулю.

2. Исследование процессов в автономном асинхронном генераторе при работе в импульсном режиме

В обычных режимах работы ААГ возбуждающая емкость и нагрузка соединены параллельно / рис. 7 а /. При этом мгновенное значение тока генератора i_r равно сумме токов конденсатора и нагрузки:

$$i_r = i_c + i_H \quad (42)$$

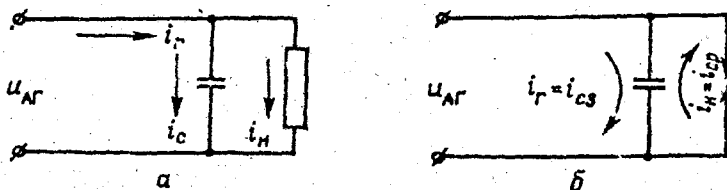


Рис. 7

Чем больше ток нагрузки, тем меньше ток конденсаторов при неизменной их емкости и постоянной скорости вращения ротора. Это объясняется тем, что с увеличением тока нагрузки увеличивается скольжение. Следовательно, при неизменной скорости вращения ротора уменьшается частота генерируемых колебаний. Это приводит к увеличению емкостного сопротивления конденсаторов $X_C = 1/\omega C$, а значит, — и к уменьшению намагничивающего емкостного тока I_C . Уменьшение I_C в свою очередь, ведет к снижению напряжения на зажимах генератора.

Рассмотрим этот случай, используя магнитные характеристики машины /нагрузочные и характеристики хода /, и вольт-амперные характеристики / ВАХ/ конденсаторов одной и той же емкости. На рис. 8 приведены: характеристика х. х. ОД, нагрузочные характеристики ОЕ

и ОК; ВАХ конденсаторов ОМ, ОН и ОЕ при постоянной скорости вращения ротора.

Точка А пересечения характеристик х.х. генератора с ВАХ конденсаторов соответствует установившемуся режиму. При этом ток х. х. машины равен I_{00x} , напряжение — U_{xx} .

При подключении к генератору активной или активно-индуктивной нагрузки магнитизирующий ток машины, протекающий через конденсаторы, уменьшается / допустим, до величины I_{0H} /. При этом магнитная / теперь уже на-

грузочная / характеристика машины опускается вниз и занимает положение ОЕ. Одновременно происходит увеличение скольжения, а следовательно, уменьшение частоты токов статора [9] :

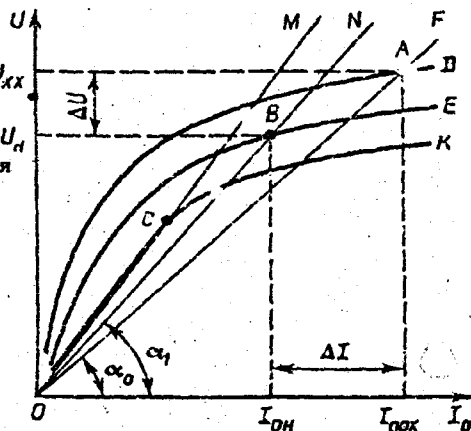


Рис. 8

$$\Delta f = -p\eta_r \frac{s}{1-s} \quad /43/$$

В свою очередь, это влечет за собой увеличение емкостного сопротивления конденсаторов. При этом ВАХ конденсаторов поворачивается на угол α , против часовой стрелки и занимает положение ОН. Теперь напряжение на зажимах генератора определяется точкой В пересечения магнитной характеристики ОЕ с ВАХ конденсаторов ОН. При переходе от х.х. к номинальной нагрузке напряжение падает на величину ΔU , а емкостный ток — на ΔI_0 :

$$\Delta U = U_{xx} - U_H, \quad \Delta I_0 = I_{00x} - I_{0H} \quad /44/$$

По мере увеличения нагрузки магнитная характеристика машины опускается вниз / ОК /, а ВАХ конденсаторов продолжает поворачиваться против часовой стрелки / ОМ /. Так как ток через конденсаторы уменьшается, то генератор все более размагничивается, что ведет к дальнейшему уменьшению напряжения на его зажимах С

переходом рабочей точки на прямолинейный участок магнитной характеристики машины ОС напряжение падает до нуля. Таким образом, режим самовозбуждения сохраняется до некоторой определенной нагрузки, характеризующей предел статической устойчивости машины.

Иная картина получается при работе ААГ в импульсных режимах / рис. 76 /. Во время заряда емкостных накопителей импульсные потребители отключены от конденсаторов и от генератора. При этом ток генератора является зарядным током конденсатора. Включаются импульсные потребители на короткий, по сравнению с периодом основной гармонической составляющей, промежуток времени $t_n \approx 0,001T$.

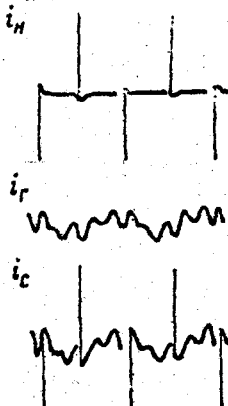


Рис. 9

При этом разрядный ток конденсатора является током импульсного потребителя / рис 9 /. Во время разряда накопителя ток генератора через импульсный потребитель не проходит, что подтверждается осциллограммой процесса / рис.9 /.

При работе ААГ в импульсных режимах соединение импульсных потребителей и емкостных накопителей нельзя считать параллельным, как это имело место при работе в обычных режимах.

В импульсных режимах

$$i_c = i_r + i_n, \quad /45/$$

т. е. во время заряда энергия генератора преобразуется в энергию электрического поля конденсаторов, а во время разряда последняя отдается потребителю.

Следовательно, в импульсных режимах генератор практически отключен от импульсных потребителей и работает на заряд периодически разряжающейся емкости. Однако поскольку активная энергия отбрасывается через конденсаторы от генератора, то в интегральном смысле импульсную нагрузку можно считать активно-емкостной.

Напряжение и ток машины при этом несинусоидальны и в общем виде описываются уравнениями

$$u = U_0 + \sum_{k=1}^n U_{mk} \sin(k\omega t + \phi_{uk}),$$

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^n I_{mk} \sin(k\omega t + \phi_{uk} - \phi_k). \quad /46/$$

Определим величину возбуждающей емкости при периодических разрядах. Так как активное сопротивление в цепи ничтожно мало / сопротивление монтажных проводов / по сравнению с емкостным, то при

отключенных и пульсных потребителей емкость, необходимая для возбуждения ААГ до U_H , определяется выражением

$$C = \frac{I}{\omega U_H} \quad /47/$$

Отсюда $I = \omega C U_H$. При разрядах емкостей, например через $T/2$ основной гармонической, для действующего значения напряжения в соответствии с [5] имеем:

$$U = \sqrt{1 + \frac{U_1^2}{U_1^2} + \frac{U_3^2}{U_1^2} + \dots} \quad /48/$$

Решив уравнения относительно I , получим

$$I = \omega C U_1 \sqrt{1 + 9 \frac{U_3^2}{U_1^2} + 25 \frac{U_5^2}{U_1^2} + \dots} \quad /49/$$

Величину расчетной емкости определим из уравнения

$$C = C_0 \sqrt{\frac{1 + 9 \frac{U_3^2}{U_1^2} + 25 \frac{U_5^2}{U_1^2} + \dots}{1 + \frac{U_3^2}{U_1^2} + \frac{U_5^2}{U_1^2} + \dots}}, \quad /50/$$

где C_0 - действительное значение емкости.
Обозначив

$$K_C = \sqrt{\frac{1 + 9 \frac{U_3^2}{U_1^2} + 25 \frac{U_5^2}{U_1^2} + \dots}{1 + \frac{U_3^2}{U_1^2} + \frac{U_5^2}{U_1^2} + \dots}}, \quad /51/$$

уравнение /50/ запишем так:

$$C = K_C C_0 \quad /52/$$