

На правах рукописи

УСАЧЕВ МАКСИМ ВИКТОРОВИЧ

**РЕЖИМЫ РАБОТЫ МАШИННО-ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА
ДИСКОВОЙ КОНСТРУКЦИИ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2002

Работа выполнена на кафедре электрических машин и аппаратов
Томского политехнического университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Чучалин А.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Хомутов О.И.
кандидат технических наук, доцент
Педиков В.М.

Ведущее предприятие: открытое акционерное общество
“Сибэлектромотор”, г. Томск

Защита состоится “25” декабря 2002 года в 15 часов на заседании
диссертационного совета К 212.269.03 при Томском политехническом
университете в актовом зале главного корпуса (634034, г. Томск, пр. Ленина,
30, ТПУ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “__” ноября 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент _____ А.Е. Алехин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы обусловлена необходимостью разработки новых типов автономных электромашинных и машинно-вентильных источников питания средней и большой мощности для работы в импульсных ($10^{-3} - 10^{-2}$ с) и кратковременных ($10^{-2} - 10$ с) режимах.

Целью настоящей диссертационной работы является исследование импульсных и кратковременных режимов работы автономного дискового машинно-вентильного генератора и разработка рекомендаций по использованию машин данного типа для питания различных потребителей. В работе были поставлены следующие задачи:

- исследование электромагнитных и электромеханических переходных процессов в дисковых машинно-вентильных генераторах при работе в импульсных и кратковременных режимах;
- изучение физического явления импульсного намагничивания дисковых машинно-вентильных генераторов;
- разработка рекомендаций по использованию явления намагничивания для повышения эффективности работы генераторов в импульсных режимах;
- анализ энергетических и удельных показателей генераторов при работе на различную нагрузку в импульсных и кратковременных режимах;
- определение области предпочтительного применения дисковых машинно-вентильных генераторов и разработка рекомендаций по выбору режимов работы.

Методика проведения исследований. Исследования переходных процессов и энергетических характеристик генераторов проведены методом математического моделирования. Проверка адекватности разработанной математической модели проводилась путем сопоставления теоретических результатов с результатами исследований экспериментального образца генератора.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- исследовано физическое явление импульсного намагничивания дисковых машинно-вентильных генераторов при нагрузках, близких к внезапному короткому замыканию за выпрямителем;
- изучен характер изменения интенсивности эффекта намагничивания в зависимости от параметров генератора и нагрузки;
- показана возможность полезного использования эффекта намагничивания для повышения энергетических характеристик дисковых машинно-вентильных генераторов при работе в импульсных режимах;
- определены условия полезного использования эффекта намагничивания и характеристики генераторов при работе на различную нагрузку в кратковременных и импульсных режимах.

Практическая ценность результатов работы определяется следующим:

- разработана универсальная математическая модель, позволяющая исследовать режимы работы и энергетические характеристики дисковых машинно-вентильных генераторов различных габаритов;
- на основе теоретических и экспериментальных исследований

определены соотношения параметров генератора и нагрузки, обеспечивающие максимальные энергетические характеристики в импульсных и кратковременных режимах;

- рассчитаны удельные и энергетические показатели генераторов при работе на активную нагрузку в ударном режиме и режиме получения квазипрямоугольных импульсов тока, а также в режимах заряда индуктивных и емкостных накопителей;

- на основании сравнительного анализа удельных и энергетических показателей определена область предпочтительного использования дисковых машинно-вентильных генераторов;

- получены универсальные зависимости, устанавливающие связь между параметрами генератора и его характеристиками для выбора предпочтительных режимов работы на активную нагрузку.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы использованы в Федеральном государственном унитарном предприятии НППЦ “Полус” (г. Томск) при разработке и создании новых типов специальных автономных электромеханических преобразователей энергии.

Апробация работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались, обсуждались и получили одобрение на V областной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Современные техника и технологии” (г. Томск, 1999 г.); XVI научно-технической конференции “Электронные и электромеханические системы и устройства” (г. Томск, 2000 г.); IV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов “Решетневские чтения” (г. Красноярск, 2000 г.); VII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Современные техника и технологии” (г. Томск, 2001 г.); международной научно-технической конференции “Электромеханические преобразователи энергии” (г. Томск, 2001 г.); VIII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Современные техника и технологии” (г. Томск, 2002 г.).

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 8 научных работ.

Структура и объем диссертационной работы. Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Она содержит 124 страницы машинописного текста с 5 таблицами, 47 страниц с 88 рисунками, 10 страниц списка литературы из 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель и основные задачи, охарактеризованы научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведена аннотация основных разделов работы.

В первом разделе работы проведен анализ современной научно-технической литературы, посвященной теории и практике электромашинного

генерирования мощностей в импульсных и кратковременных режимах. Показано, что возможности повышения энергетических и удельных характеристик автономных электромашинных и машинно-вентильных источников питания импульсного и кратковременного действия на базе генераторов традиционной цилиндрической конструкции с одним воздушным зазором между статором и ротором к настоящему времени исчерпаны, в связи с чем целесообразным является построение таких источников на базе электрических машин нетрадиционного конструктивного исполнения. В рамках реализации данного направления значительных результатов позволяет добиться использование многозазорных генераторов дисковой конструкции. На кафедре электрических машин и аппаратов Томского политехнического университета разработан многофазный синхронный генератор, в котором каждая фаза якорной обмотки расположена на отдельном дисковом модуле (рис.1). Конструктивная схема активной зоны дискового модуля машины приведена на рис. 2. Генератор работает на однофазную нагрузку через управляемый однополупериодный выпрямитель (рис.3). Сочетание конструктивного и схемного решения обуславливает следующие принципиальные отличия дискового машинно-вентильного генератора от генераторов цилиндрической конструкции:

- 1) Преобразование энергии в многочисленных воздушных зазорах.
- 2) Пониженное взаимное влияние фаз якорной обмотки за счет их разнесения в пространстве. Параметрическая особенность генератора состоит в том, что собственные индуктивности фаз якорной обмотки существенно меньше взаимных индуктивностей между фазами, причем, чем дальше фазы разнесены в пространстве, тем ниже взаимные индуктивности между ними.
- 3) Разнесение процессов деформации основного магнитного поля фазами якорной обмотки во времени благодаря использованию однополупериодной схемы выпрямления.

Указанные факторы обуславливают особый характер протекания переходных процессов в генераторе. Машина не размагничивается даже при коротком замыкании за выпрямителем, причем в цепи возбуждения не применяются никакие регулировки, а на роторе не предусматривается никаких дополнительных обмоток.

Однако детального изучения электромагнитных и электромеханических переходных процессов в дисковых машинно-вентильных генераторах с различными параметрами до сих пор не проводилось. Кроме того, не исследовались энергетические характеристики генераторов при работе на нагрузку различного характера в режимах различной длительности. Эти вопросы требуют подробного рассмотрения с целью объективной оценки перспектив использования машинно-вентильных генераторов дисковой конструкции в импульсных и кратковременных режимах и разработки рекомендаций потенциальным потребителям.

Второй раздел посвящен исследованию электромагнитных переходных процессов в дисковых машинно-вентильных генераторах. Приведено описание

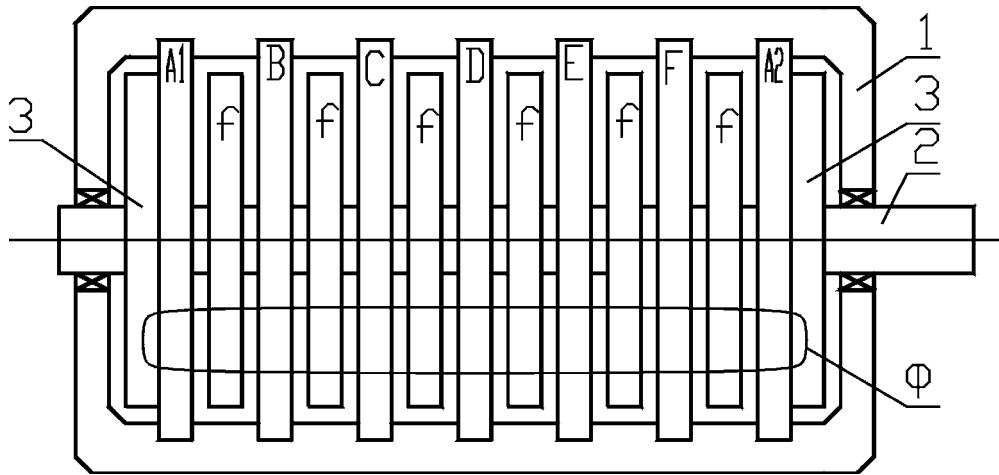


Рис. 1

1 – корпус; 2 – вал; 3 – замыкающие магнитопроводы; A, B, C, D, E, F – фазы якорной обмотки; f – обмотка возбуждения; Φ – основной магнитный поток.

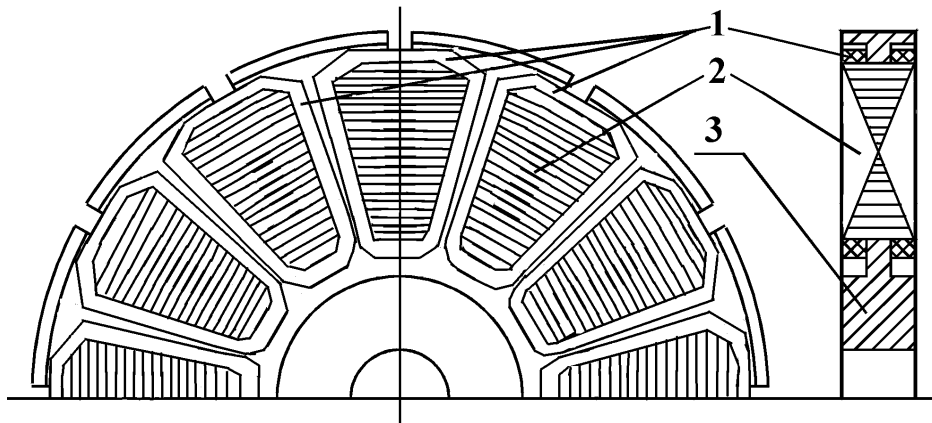


Рис. 2

1 – обмотка; 2 – полюсные вставки; 3 – несущее основание.

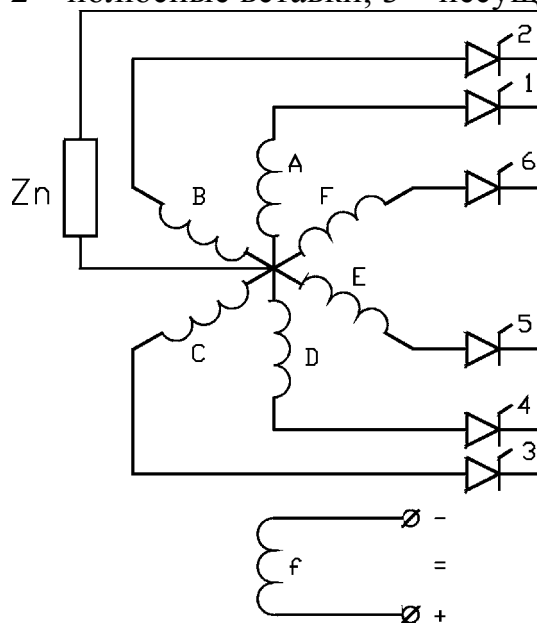


Рис. 3

разработанной автором универсальной математической модели, основанной на численном решении дифференциальных уравнений электрического, механического и теплового равновесия генератора. В модели учитывается переменное насыщение магнитопровода машины основным магнитным потоком. Вентили представлены как идеальные ключи, замыкающиеся при подаче управляющих сигналов в моменты превышения фазных ЭДС над падением напряжения на активном сопротивлении нагрузки и размыкающиеся при переходе фазных токов через нулевые значения в отрицательном направлении. Учет коммутаций в электрической схеме генератора производится методом, основанным на представлении системы «генератор-выпрямитель-нагрузка» схемой с переменной топологической структурой. Моделирование процессов производится в непреобразованной (фазной) системе координат. В качестве исходных данных математической модели служат зависимости индуктивностей само- и взаимоиндукции всех контуров машины от угла поворота ротора, полученные путем решения серии полевых задач методом конечных разностей. Модель реализована в виде компьютерной программы на языке Turbo Pascal 7.0.

Результаты математического моделирования критического режима внезапного короткого замыкания за выпрямителем подтвердили способность генератора не размагничиваться при повышенных нагрузках. Максимальные потокосцепления фаз якорной обмотки в течение переходного процесса не снижаются по сравнению с начальным значением, соответствующим режиму холостого хода (рис. 4). Более того, на начальной стадии процесса максимальные потокосцепления фаз увеличиваются по сравнению с режимом холостого хода, что говорит о намагничивании генератора. Проведен детальный анализ физической картины процессов в обмотках генератора, который показал, что возрастание потокосцеплений разомкнутых фаз якорной обмотки обусловлено сочетанием конструктивного и схемного решения машины и вызвано увеличением тока возбуждения, происходящим в ответ на размагничивающее действие со стороны замкнутых фаз обмотки якоря.

Увеличение потокосцеплений на начальной стадии переходного процесса сопровождается всплесками токов в обмотках генератора и за выпрямителем (рис.5), в связи с чем в качестве критерия интенсивности эффекта намагничивания целесообразно рассматривать величину относительного изменения выпрямленного тока:

$$\Delta I_{\%} = (I_{уд} - I_{уст}) * 100\% / I_{уд},$$

где $I_{уд}$, $I_{уст}$ – соответственно, ударное и установившееся значения выпрямленного тока.

Исследована зависимость интенсивности эффекта намагничивания от параметров генератора. В связи с тем, что намагничивание разомкнутых фаз якорной обмотки вызвано увеличением тока возбуждения, в качестве критерия, характеризующего изменение параметров машины, выбрана постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке якоря:

$$T_{f0} = \omega L_f / R_f,$$

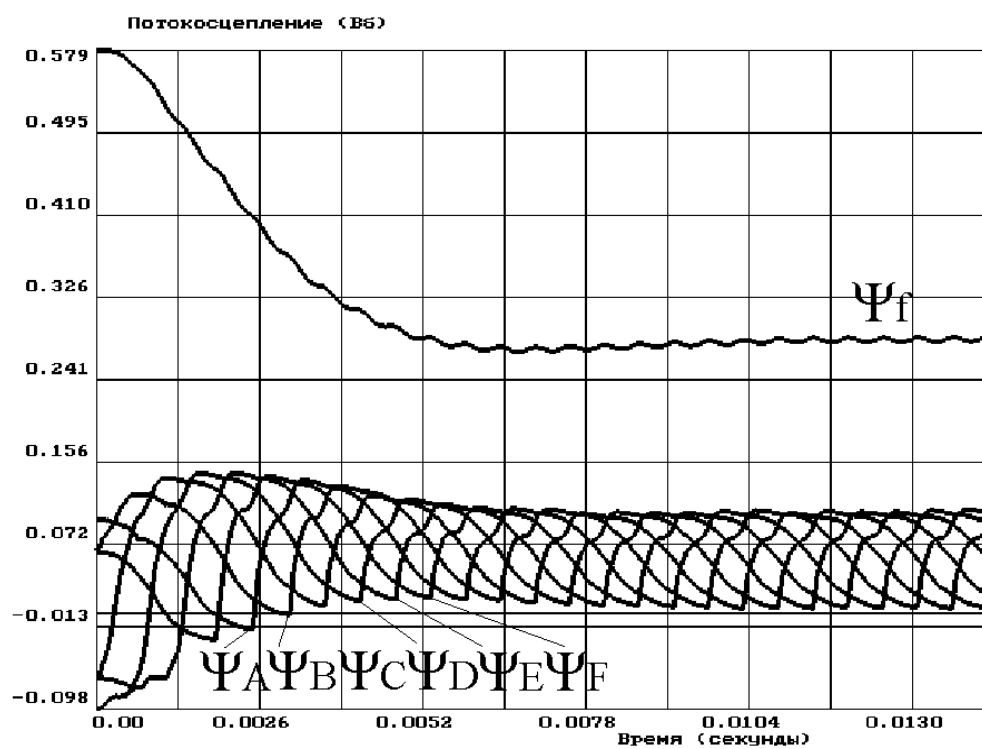


Рис. 4

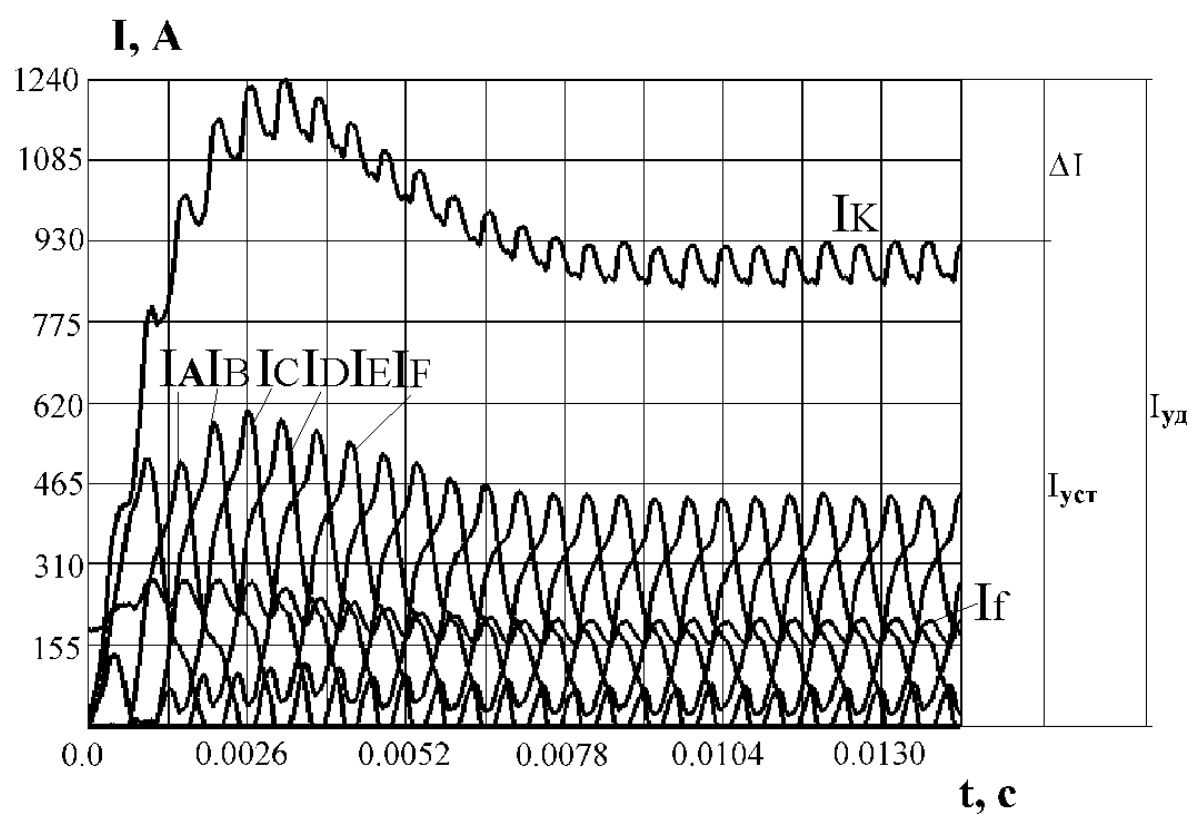


Рис. 5

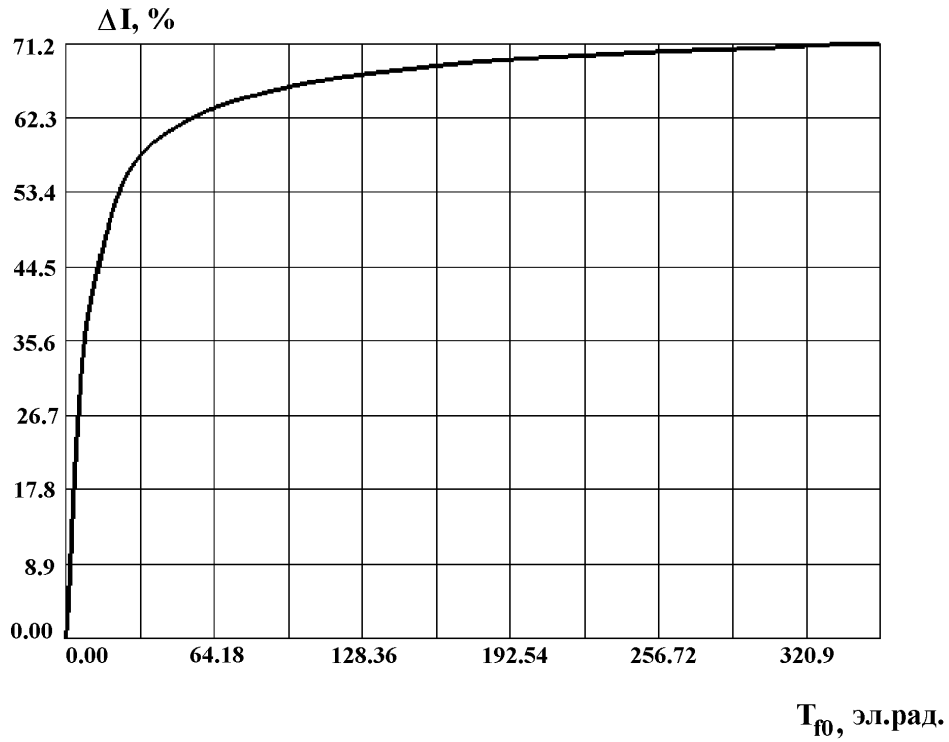


Рис. 6

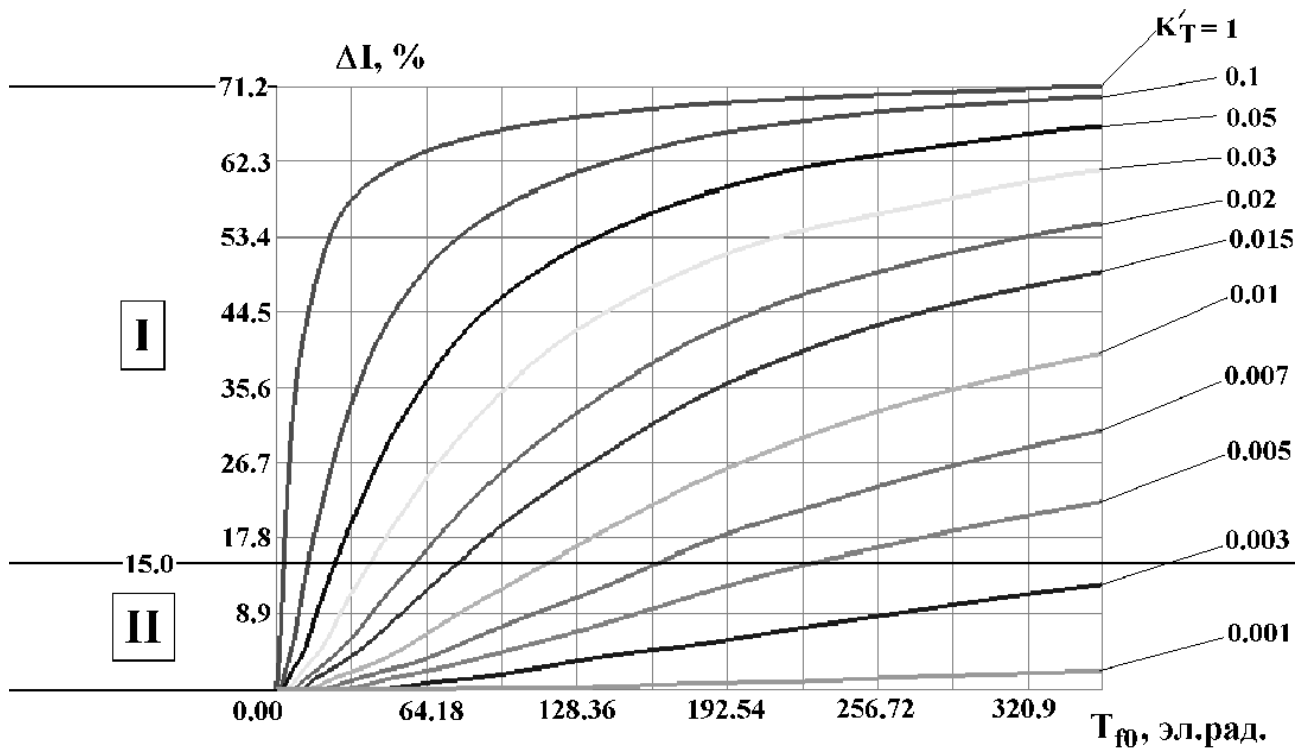


Рис. 7

I – область целесообразного использования генераторов в ударном режиме;
 II - область целесообразного использования генераторов для получения квазипрямоугольных импульсов тока.

где ω – угловая скорость изменения основного магнитного поля;

L_f , R_f – собственная индуктивность и активное сопротивление обмотки возбуждения, соответственно.

Степень взаимного влияния обмоток машины учитывается с помощью величины отношения постоянных времени:

$$K_T = T_{A0} / T_{f0},$$

где T_{A0} – средняя постоянная времени одной фазы якорной обмотки при разомкнутых обмотке возбуждения и остальных фазах, определяемая как:

$$T_{A0} = \omega L_{Acp} / R_A,$$

где $L_{Acp} = (L_{Amax} + L_{Amin}) / 2$ – среднее значение собственной индуктивности фазы.

Путем расчетов на математической модели получена зависимость $\Delta I_{\%} = f(T_{f0})$ при $K_T = const$ для режима короткого замыкания за выпрямителем (рис.6). Данная зависимость является универсальной, так как позволяет оценить изменение интенсивности эффекта намагничивания при изменении электромагнитных параметров машины любым способом (вследствие изменения габарита, степени насыщения магнитной цепи, скорости вращения ротора и т.д.) и может использоваться при проектировании дисковых машинно-вентильных генераторов

В третьем разделе исследованы энергетические и удельные показатели дисковых машинно-вентильных генераторов различных габаритов (внешний диаметр активной зоны $D_a = 0,083 - 1,33$ м) при работе на активную, индуктивную и емкостную нагрузки. Принято, что с изменением габарита генератора сохраняются размерные соотношения в активной зоне, определяющие форму кривых собственных и взаимных индуктивностей обмоток, а также число фаз машины ($m=6$) и число полюсов ($2p=12$). Скорость вращения ротора принята $n = 3000$ об/мин, напряжение возбуждения $U_f = 220$ В, что соответствует индукции в воздушных зазорах $B_{\delta} = 1,68$ Тл для всех генераторов габаритов.

Показано, что целесообразным является применение дисковых машинно-вентильных генераторов для питания активных потребителей в двух режимах – ударном (длительность не превышает 10 – 12 мс, используется ударное значение выпрямленного тока) и режиме получения квазипрямоугольных импульсов тока (кратковременное динамическое торможение в течение 0,01 – 10 с). Получены зависимости $\Delta I_{\%} = f(T_{f0}, K'_T)$, которые служат для выбора предпочтительного режима работы при заданных параметрах генератора и активной нагрузки (рис.7).

Установлено, что при работе в ударном режиме максимум мощности для генераторов всех габаритов достигается при сопротивлении нагрузки, равном эквивалентному переходному сопротивлению машины, определяемому как:

$$Z_{Г'} = E_0 / I_{куд},$$

где E_0 – амплитуда ЭДС генератора в режиме холостого хода;

$I_{куд}$ – ударное значение выпрямленного тока короткого замыкания.

Расчетные зависимости ударной (P_{max}) и удельной ($P_{уд}$) мощностей от

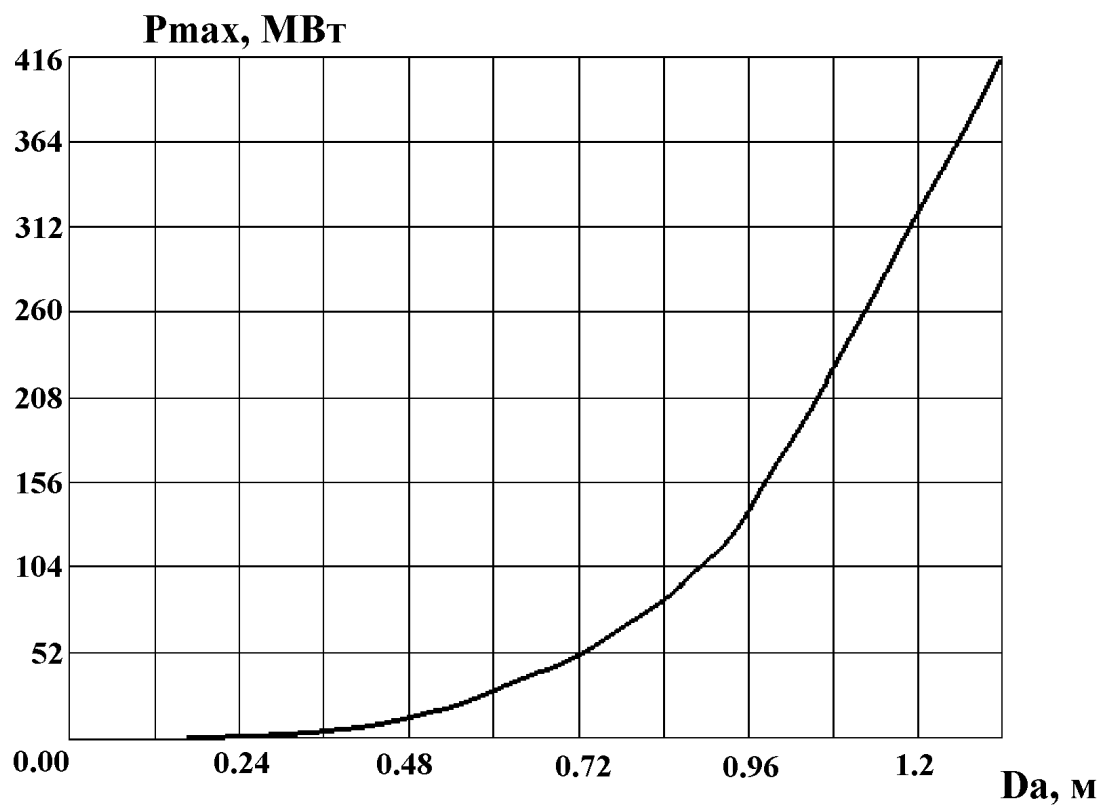


Рис. 8

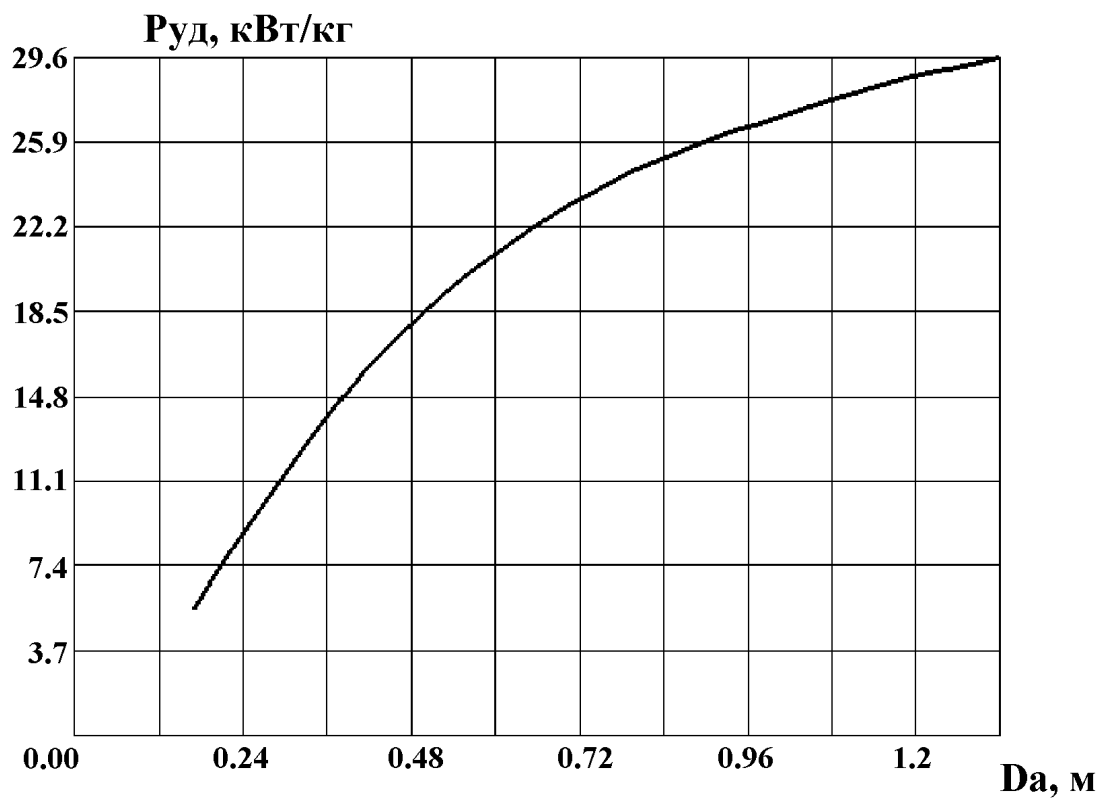


Рис. 9

габарита генератора представлены на рис. 8 и рис. 9 соответственно. Характер зависимостей соответствует закономерностям, известным для машин традиционной цилиндрической конструкции. При этом в дисковых машинно-вентильных генераторах с $D_a = 0,6 - 1,33$ м достигается удельная мощность 20 - 30 кВт/кг, что на 15 - 20 % превышает аналогичные показатели цилиндрических машин, работающих в режимах соизмеримой длительности.

Исследованы тепловые процессы при работе генераторов на согласованную нагрузку ($R_H = Z_\Gamma$) в ударном режиме. Установлено, что наиболее напряженным в тепловом отношении элементом машины является обмотка якоря. С ростом габарита машины несколько уменьшается превышение температуры обмотки за один импульс (от 0,21 °С при $D_a = 0,6$ м до 0,19 °С при $D_a = 1,33$ м) и увеличивается максимальное число импульсов, которое может быть передано в согласованную нагрузку при единичной скажности (от 430 при $D_a = 0,6$ м до 460 при $D_a = 1,33$ м).

Исследования режима генерирования квазипрямоугольных импульсов тока проведены в диапазоне габаритов машин $D_a = 0,33 - 1,33$ м при переменной скорости вращения ротора и различных значениях момента инерции маховых масс ($K_J = J_R / J_{R0} = 1,2,5,10$ где J_R, J_{R0} – соответственно, суммарный момент инерции вращающихся масс с учетом дополнительного маховика и собственное значение момента инерции ротора). В качестве исходных требований к форме импульса заданы три значения коэффициента спада вершины: $K_C = 5, 10$ и 15 %. В результате исследований для каждого значения K_C получены усредненные зависимости максимальной длительности квазипрямоугольного импульса тока T_{max} , представленной по отношению к механической постоянной времени машины T_J , и коэффициента полезного преобразования начального запаса кинетической энергии маховых масс $K_{ПР}$ от сопротивления нагрузки и момента инерции ротора. На рис. 10 и рис. 11, соответственно, представлены указанные зависимости для $K_C = 10$ %. Для других значений K_C зависимости имеют аналогичный вид, а их характерные точки приведены в таблице 1. Параметры нагрузки на графиках и в таблице выражены по отношению к эквивалентному синхронному сопротивлению генератора, определяемому как:

$$Z_\Gamma = E_0 / I_{Kуст},$$

где $I_{Kуст}$ – установившееся значение выпрямленного тока короткого замыкания.

Результаты исследований позволили выявить область целесообразного использования дополнительных маховых масс для стабилизации тока нагрузки. В качестве критерия эффективности использования маховика служит величина относительного коэффициента преобразования энергии:

$$K_{ПР}' = K_{ПР} / K_{ПР|K_J=1},$$

где $K_{ПР|K_J=1}$ - значение коэффициента преобразования кинетической энергии, достигаемое без использования дополнительных маховых масс, то есть при $K_J = 1$.

Усредненная зависимость $K_{ПР}' = f(R_H, K_J)$ для $K_C = 10$ % представлена на рис.12. Дополнительные маховые массы целесообразно использовать при

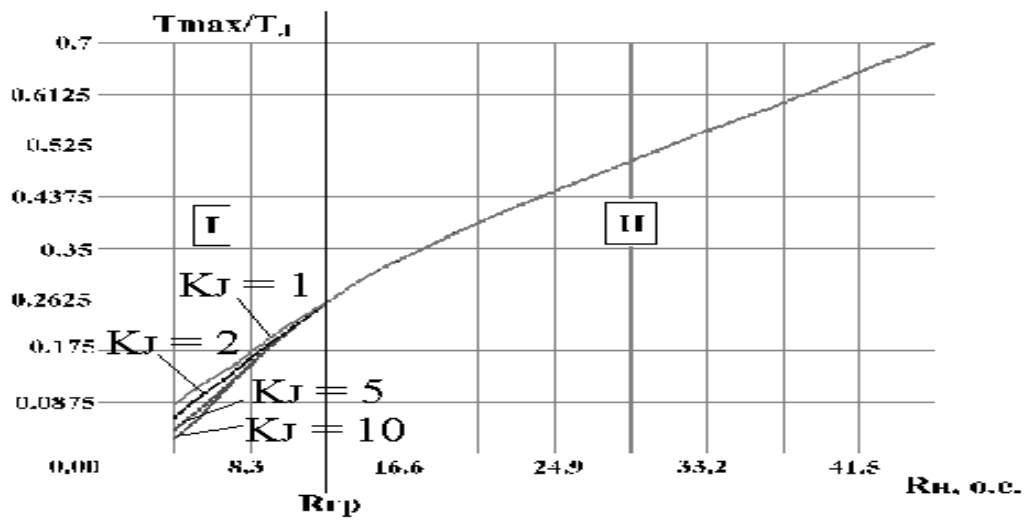


Рис. 10

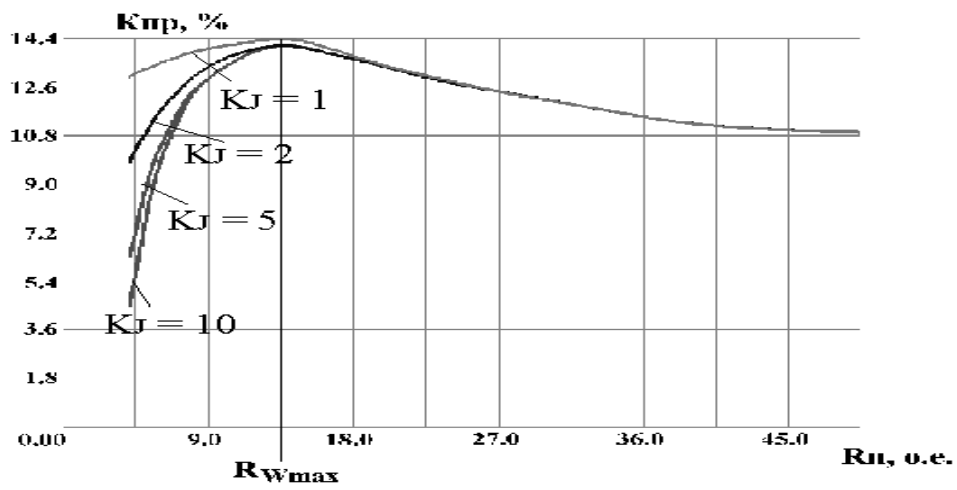


Рис.11

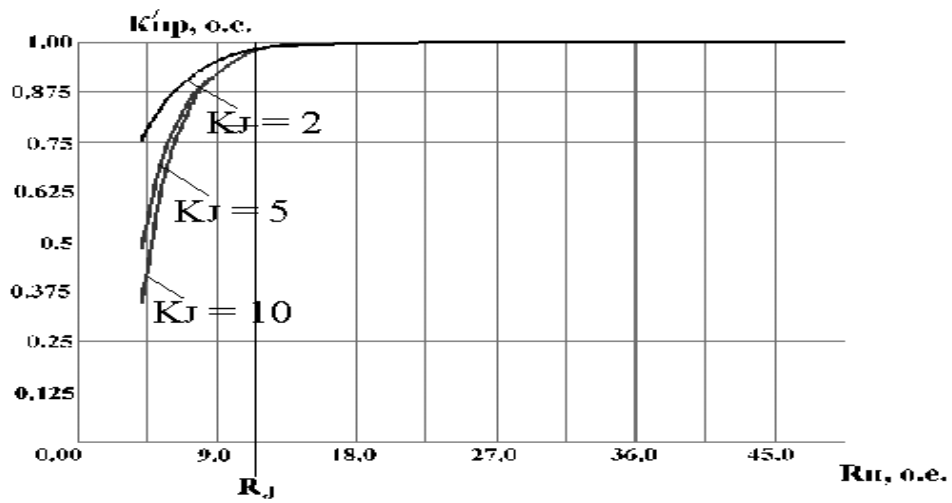


Рис. 12

сопротивлениях нагрузки $R_H \geq R_J$. Значения R_J при различных K_C приведены в таблице 1.

Таблица 1

$K_C, \%$	5	10	15
Граница областей I и II на графиках зависимостей $T_{\max}/T_J = f(R_H, K_J)$.	$R_{ГР} = (19-24)Z_{Г}$	$R_{ГР} = (11-14)Z_{Г}$	$R_{ГР} = (7,5-10)Z_{Г}$
Сопротивление нагрузки, соответствующее максимуму передаваемой энергии	$R_{W\max} = (13-17)Z_{Г}$	$R_{W\max} = (12-15)Z_{Г}$	$R_{W\max} = (10-13)Z_{Г}$
Максимальное значение коэффициента преобразования кинетической энергии маховых масс	$K_{ПР\max} = 7,1 \%$	$K_{ПР\max} = 14,4\%$	$K_{ПР\max} = 22 \%$
Граница диапазона целесообразного использования дополнительных маховых масс для стабилизации тока нагрузки	$R_J = (19-24)Z_{Г}$	$R_J = (11-14)Z_{Г}$	$R_J = (7,5-10)Z_{Г}$

Исследования работы генераторов в режиме заряда индуктивного накопителя энергии показали, что максимум зарядной мощности достигается при условии:

$$L_H = L_{\text{ср}}.$$

Зависимости удельной мощности и коэффициента преобразования энергии маховых масс от габарита машины представлены на рис. 13 и рис. 14, соответственно. Видно, что удельная мощность, развиваемая генераторами в режиме заряда индуктивного накопителя на порядок ниже, чем при питании активной нагрузки в ударном режиме. Значение коэффициента полезного преобразования кинетической энергии ротора $K_{ПР}$ при питании согласованной индуктивной нагрузки несколько ниже, чем при питании активной нагрузки квазипрямоугольными импульсами тока, причем с увеличением габарита генератора процент передаваемой накопителю энергии снижается.

Исследования работы генераторов в режиме заряда емкостного накопителя энергии показали, что максимум зарядной мощности для машин всех габаритов достигается при условии:

$$X_{A\min} \leq X_{C\text{ согл}} \leq X_{A\max},$$

где $X_{A\min}, X_{A\max}$ - соответственно, минимальное и максимальное индуктивные сопротивления фазы обмотки якоря.

Зависимости удельной мощности и коэффициента преобразования

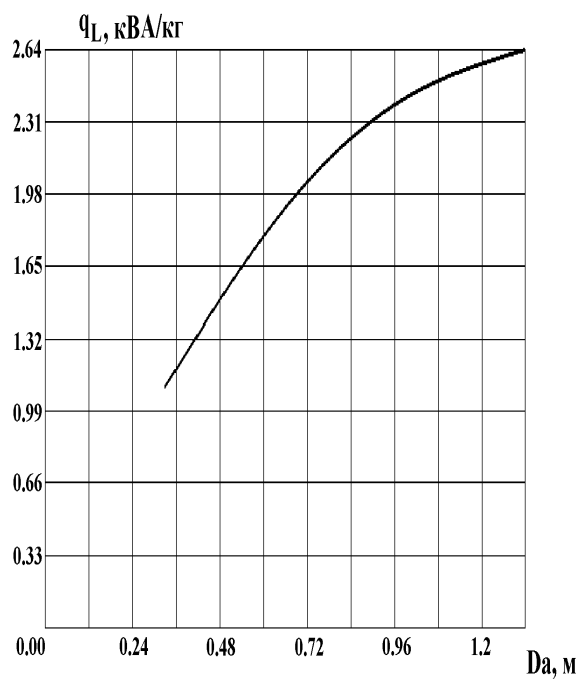


Рис.13

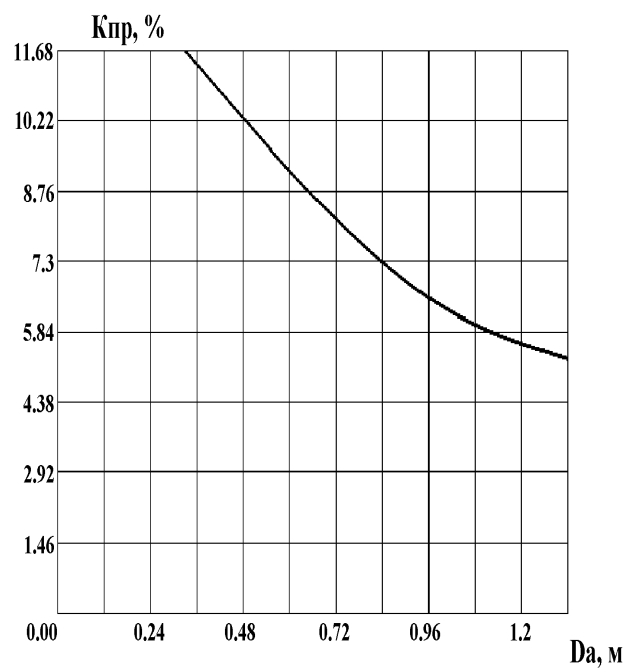


Рис. 14

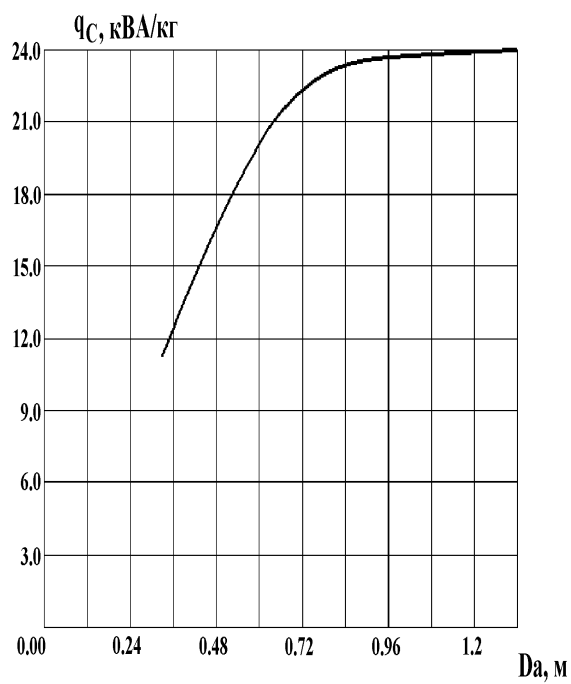


Рис.15

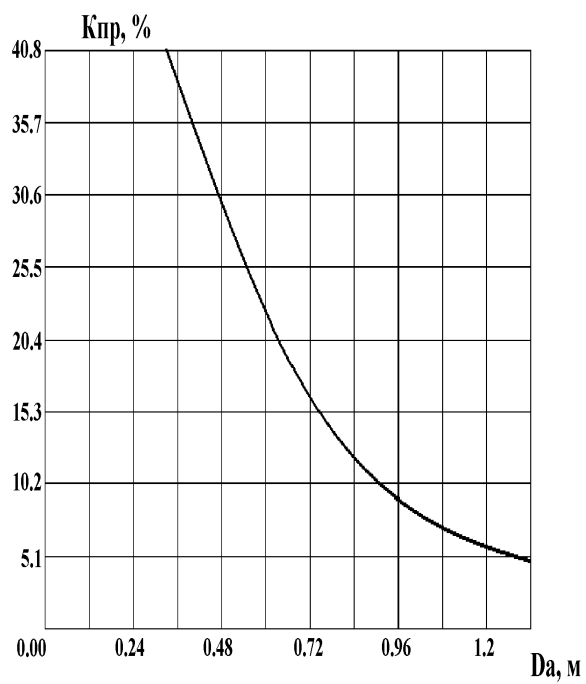


Рис. 16

кинетической энергии маховых масс генератора при работе в режиме заряда емкостного накопителя энергии представлены на рис.15 и рис.16, соответственно. Удельная мощность генераторов с $D_a = 0,6 - 1,33$ м на 10 - 20 % ниже, чем при работе на активную нагрузку в ударном режиме. Значение коэффициента полезного преобразования кинетической энергии ротора в генераторах относительно малых габаритов ($D_a \leq 0,3$ м) достигает 40 % и выше, однако с ростом габарита машины $K_{\text{ПР}}$ снижается и в диапазоне $D_a = 0,6 - 1,33$ м не превышает значений, характерных для режима питания активной нагрузки квазипрямоугольными импульсами тока.

Четвертый раздел посвящен экспериментальным исследованиям дискового машинно-вентильного генератора. Описана конструкция экспериментального образца генератора (рис. 17), приведены характеристики аппаратуры, использованной в ходе исследований. Результаты экспериментов представлены в сравнении с данными расчета на математической модели.

Необходимо отметить, что из соображений техники безопасности экспериментальные исследования проведены при пониженных значениях скорости вращения ротора и напряжения возбуждения ($n = 1150$ об/мин, рабочая точка машины находится на линейном участке кривой намагничивания), не позволяющих добиться максимально возможных энергетических показателей генератора. Однако такие условия вполне пригодны для подтверждения физической картины процессов и оценки адекватности разработанной математической модели.

Экспериментальные и расчетные зависимости ЭДС фазы якорной обмотки машины от времени представлены на рис. 18 и рис. 19 соответственно. Совпадение формы кривых является вполне удовлетворительным. Относительная разность теоретического и экспериментального значений амплитуды фазной ЭДС не превышает 3,5 %.

Экспериментальная картина переходных процессов при включении генератора на низкоомную активную нагрузку представлена на рис. 20. Осциллограмма подтверждает, что на начальной стадии процесса генератор намагничивается. В обмотке возбуждения машины (нижний луч) и за выпрямителем (верхний луч) имеют место заметные всплески токов. Расчетные зависимости, полученные при тех же исходных данных, показаны на рис. 21. Относительная разность теоретических и экспериментальных значений выпрямленного тока не превышает 5 %.

На рис. 22 представлены экспериментальные осциллограммы токов в обмотке возбуждения и за выпрямителем, иллюстрирующие работу генератора на индуктивную нагрузку. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что интенсивность эффекта намагничивания при индуктивном характере нагрузки низка. Ток возбуждения в процессе питания потребителя практически не увеличивается, что говорит о сравнительно слабом размагничивающем действии на обмотку возбуждения со стороны замкнутых фаз обмотки якоря. Соответствующие расчетные зависимости приведены на рис. 23.

На рис. 24 представлены экспериментальная и расчетная зависимости мощности, развиваемой генератором в квазиустановившемся режиме, от

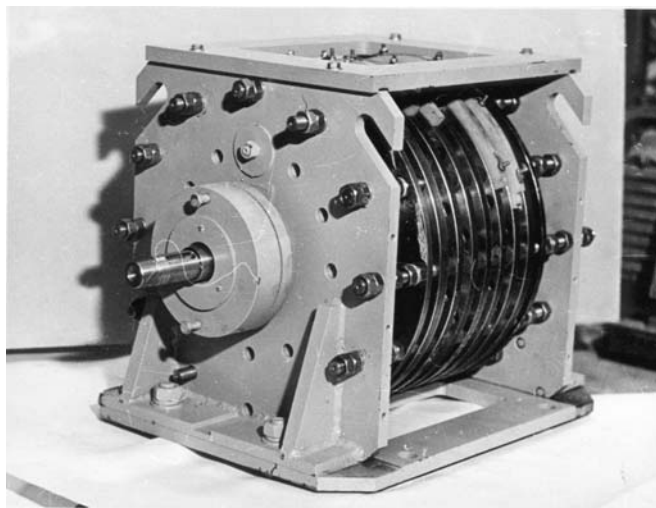


Рис. 17

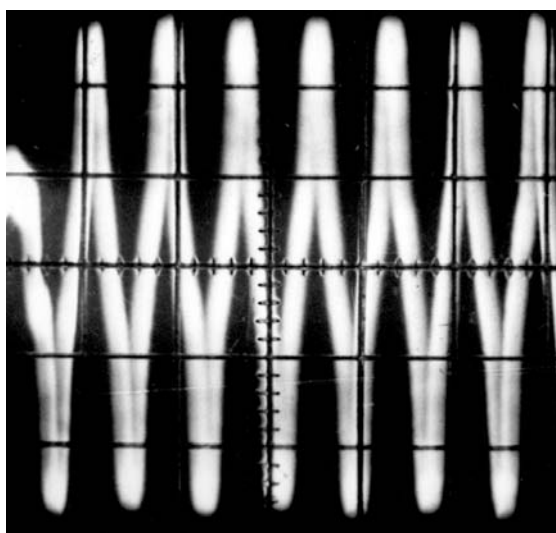


Рис. 18

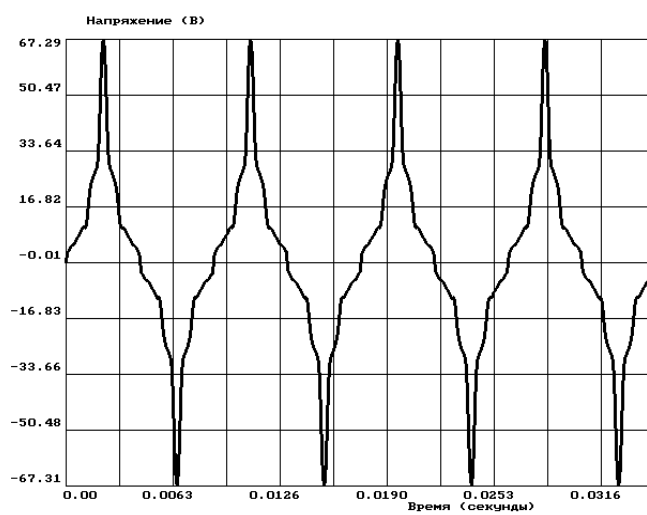


Рис. 19

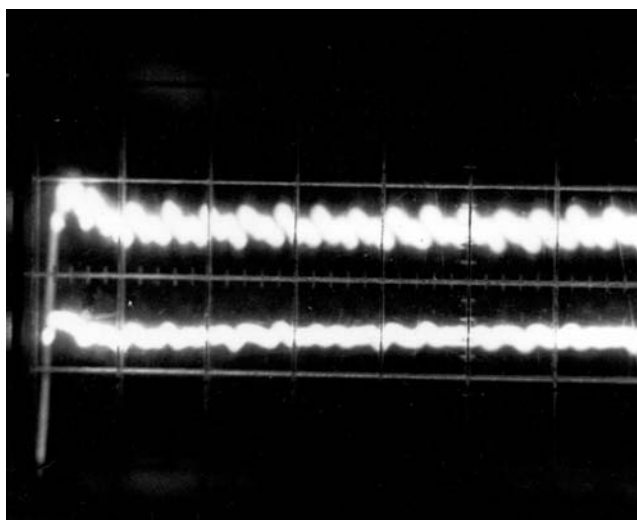


Рис.20

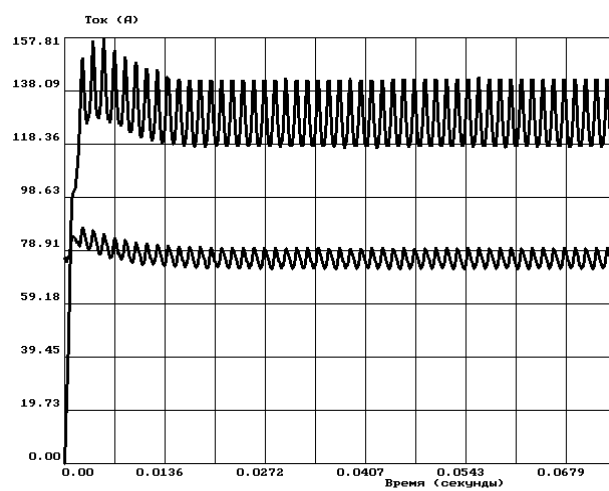


Рис. 21

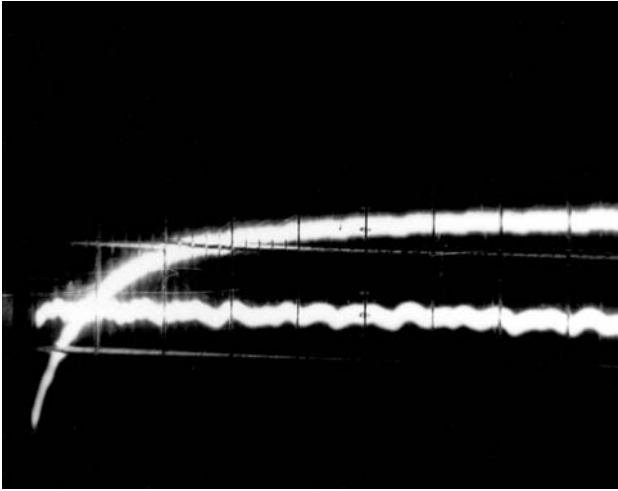


Рис. 22

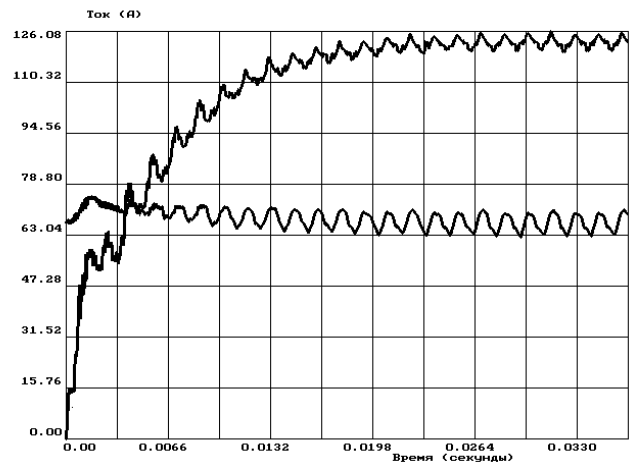


Рис. 23

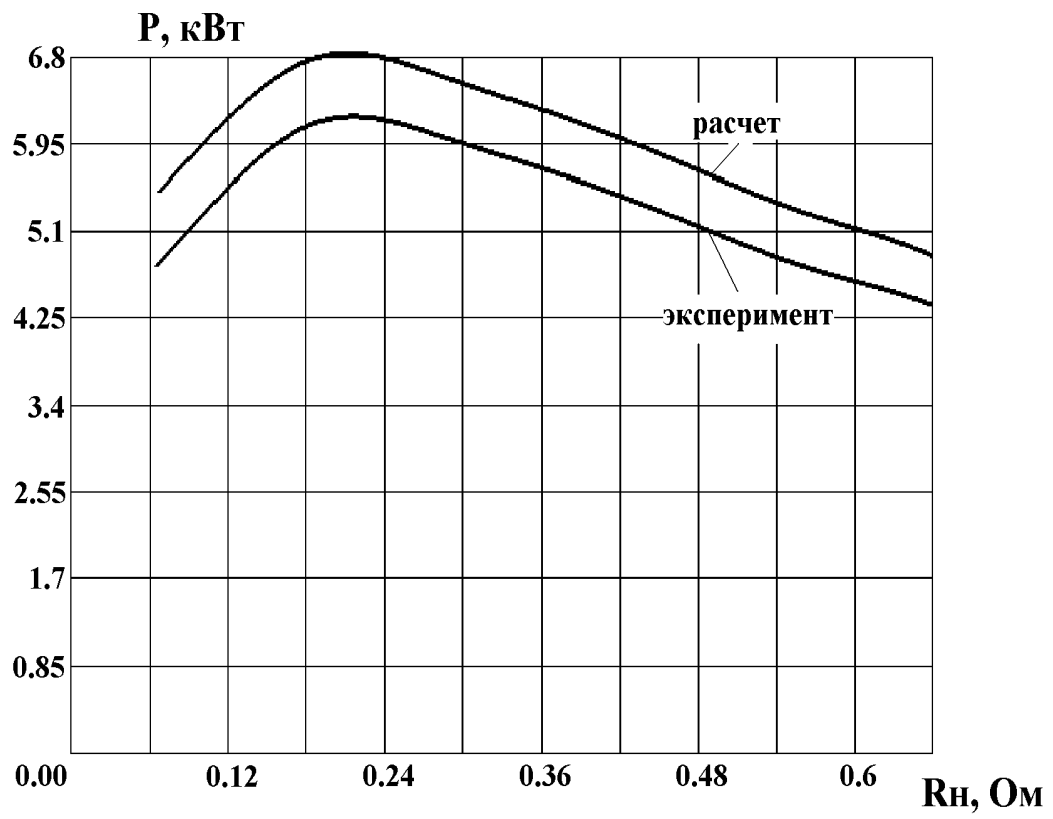


Рис. 24

активного сопротивления нагрузки. Проведенные исследования позволили сформулировать условие достижения максимума установившейся мощности генератора в следующем виде:

$$R_H = Z_L.$$

Как следует из зависимостей, приведенных на рис. 24, расчетные значения мощности отличаются от экспериментальных не более, чем на 11 %, что является допустимым.

В целом результаты экспериментальных исследований подтвердили корректность основных теоретических положений, выявленных в результате математического моделирования и пригодность разработанной математической модели для описания рабочих режимов дисковых машинно-вентильных генераторов как в количественном, так и в качественном отношении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований импульсных и кратковременных режимов работы дисковых машинно-вентильных генераторов позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Принципиальная особенность протекания электромагнитных переходных процессов в дисковых машинно-вентильных генераторах заключается в намагничивании фаз якорной обмотки машины в периоды бестоковых пауз. Анализ физической картины электромагнитного переходного процесса внезапного короткого замыкания за выпрямителем показал, что намагничивание разомкнутых фаз обмотки якоря вызвано увеличением тока в обмотке возбуждения, происходящим в ответ на размагничивающее действие со стороны замкнутых фаз якорной обмотки.

2. Критерием интенсивности эффекта намагничивания является величина относительного изменения выпрямленного тока $\Delta I_{\%}$. Значение $\Delta I_{\%}$ зависит от параметров генератора и нагрузки. При заданных параметрах нагрузки зависимость интенсивности эффекта намагничивания от параметров генератора имеет вид кривой с насыщением. При заданных параметрах генератора максимальное значение $\Delta I_{\%}$ достигается в режиме короткого замыкания за выпрямителем. При увеличении как активного, так и индуктивного сопротивления нагрузки интенсивность эффекта намагничивания снижается, что обусловлено ослаблением размагничивающего действия замкнутых фаз якорной обмотки на обмотку возбуждения. Снижение размагничивающего действия со стороны замкнутых фаз в случае активной нагрузки связано с уменьшением фазных токов, а в случае индуктивной нагрузки - с уменьшением скорости протекания электромагнитных процессов.

3. Эффект намагничивания дисковых машинно-вентильных генераторов может быть полезно использован при питании активной нагрузки в ударном режиме. Целесообразным режимом питания активных потребителей с применением дисковых машинно-вентильных генераторов является также режим получения квазипрямоугольных импульсов тока, в котором полезно используется способность машин данного типа не размагничиваться при повышенных нагрузках. Выбор предпочтительного режима работы генератора при заданных параметрах активной нагрузки целесообразно производить с

использованием зависимостей $\Delta I_{\%} = f(T_{j0}, K'_T)$. В случае $\Delta I_{\%} \geq 15 \%$ существует возможность полезного использования эффекта намагничивания, в связи с чем предпочтительным режимом работы генератора является ударный. В случае $\Delta I_{\%} < 15 \%$ генератор практически с момента включения находится в квазиустановившемся режиме, в связи с чем рациональным является его использование для получения квазипрямоугольных импульсов тока.

4. При индуктивном характере нагрузки наилучшие удельные показатели дисковых машинно-вентильных генераторов достигаются при работе в режиме заряда индуктивного накопителя энергии, а при емкостном характере нагрузки - в режиме заряда емкостного накопителя энергии.

5. Согласованными соотношениями параметров генератора и нагрузки, обеспечивающими максимум передаваемой потребителю мощности, являются $R_H \approx Z'_G$ при работе на активную нагрузку в ударном режиме, $R_H \approx Z_G$ при питании активной нагрузки в квазиустановившемся режиме, $L_H \approx L_{Acр}$ в режиме заряда индуктивного накопителя и $X_{Amin} \leq X_C \leq X_{Amax}$ в режиме заряда емкостного накопителя.

6. Удельная мощность дисковых машинно-вентильных генераторов при питании активной нагрузки в ударном режиме достигает 20 – 30 кВт/кг, что превышает аналогичные показатели генераторов цилиндрической конструкции, близких по габаритам и длительности рабочего режима. Максимальное значение коэффициента преобразования кинетической энергии вращающихся масс при питании активной нагрузки квазипрямоугольными импульсами тока не зависит от габарита машины и изменяется прямо пропорционально задаваемому значению коэффициента спада вершины импульса (в диапазоне от 7 % при $K_C = 5\%$ до 22 % при $K_C = 15 \%$)

7. Удельная мощность генераторов в режиме заряда индуктивного накопителя на порядок ниже, чем при работе на активную нагрузку в ударном режиме. Коэффициент преобразования кинетической энергии не превышает значений, достигаемых при работе в режиме генерирования квазипрямоугольных импульсов тока.

8. Удельная мощность генераторов в режиме заряда емкостного накопителя на 10 – 20 % ниже, чем при работе на активную нагрузку в ударном режиме. Коэффициент преобразования кинетической энергии с увеличением габарита машины уменьшается и при $D_a \geq 0,6$ м не превышает значений, характерных для режима генерирования квазипрямоугольных импульсов тока.

9. Сравнительный анализ удельных и энергетических показателей дисковых машинно-вентильных генераторов при работе на нагрузку различного характера показывает, что предпочтительной областью применения машин данного типа являются активные потребители.

10. Исследования на экспериментальном образце генератора хорошо согласуются с теоретическими положениями, сформулированными на основе результатов математического моделирования. Эксперименты свидетельствуют об адекватности разработанной математической модели генератора как в количественном, так и в качественном отношении и подтверждают

возможность достижения в дисковых машинно-вентильных генераторах удельных и энергетических показателей, превышающих характерные для других типов электромашинных генераторов импульсного и кратковременного действия.

Автор благодарит научного консультанта, кандидата технических наук Муравлева Игоря Олеговича за внимательное отношение к работе и практическую помощь в решении поставленных задач.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. Усачев М.В. Математическое моделирование переходных процессов в многофазном электромашинном генераторе дисковой конструкции.// Решетневские чтения: Тезисы докладов IV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов. - Красноярск, САА, 2000.- с. 31 – 33.

2. Усачев М.В., Муравлев И.О. Генератор для питания электрофизических установок.// Пятая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Современные техника и технологии”. Сб. статей.- Томск: ТПУ, 1999, с. 280 - 282.

3. Усачев М.В., Муравлев И.О., Чучалин А.И. Математическое моделирование тепловых процессов в шестифазном синхронном генераторе дисковой конструкции.//Современные техника и технологии: Труды седьмой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - Томск: ТПУ, 2001.- Т.2. - с. 98 - 100.

4. Усачев М.В., Чучалин А.И., Муравлев И.О. Работа многофазного электромашинного генератора дисковой конструкции на активную нагрузку. // Электронные и электромеханические системы и устройства: Тез. докл. XVI науч.-техн. конф. 19 – 20 октября 2000 г. – Томск: НПП «Полус», 2000.- с. 92 – 93.

5. Чучалин А.И., Муравлев И.О., Усачев М.В. Намагничивание синхронного генератора дисковой конструкции при работе на выпрямитель.//Оптимизация режимов работы систем электроприводов: Межвуз. сборник. - Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2000.- с. 68 - 77.

6. Чучалин А.И., Муравлев И.О., Усачев М.В. Автономные электромашинные генераторы многодисковой конструкции.// Электромеханические преобразователи энергии: Материалы Международной науч.-техн. конф. 6-7 сентября 2001 г.- Томск: ТПУ, 2001. - с. 129.

7. Чучалин А.И., Муравлев И.О., Усачев М.В. Энергетические показатели электромашинных генераторов многодисковой конструкции при работе на активную нагрузку.//Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. трудов НПП “Полус”. - Томск, 2001. - с. 280 - 286.

8. Чучалин А.И., Муравлев И.О., Усачев М.В. Эффект намагничивания синхронного генератора многодисковой конструкции при работе на активную нагрузку через однополупериодный выпрямитель.// Электричество, 2002, № 1, с. 32 - 36.