# Соболь Александр Николаевич

# Защита автономных асинхронных генераторов Сельскохозяйственного назначения От витковых коротких замыканий

Специальность: 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

#### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент

Богдан Александр Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Тропин Владимир Валентинович

кандидат технических наук, доцент

Кобзистый Олег Валентинович

Ведущая организация: Государственное научное учреждение «Северокавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства» (г. Зерноград).

Защита диссертации состоится 15 декабря 2010 г., в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.038.08 Кубанского государственного аграрного университета по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина 13, Кубанский государственный аграрный университет

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  $\Phi \Gamma O Y B \Pi O$  «Кубанский государственный аграрный университет».

Автореферат размещен на сайте www.kubsau.ru «\_\_\_\_»ноября 2010 года.

Автореферат разослан 12 ноября 2010 года.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук, профессор

В.С. Курасов

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы.

В настоящее время широко известны автономные асинхронные генераторы с емкостным самовозбуждением (ААГ). Теоретические исследования и практический опыт показывают перспективы их применения в сельском хозяйстве, в том числе в качестве автономного источника электроснабжения животноводческих комплексов и птицефабрик. Значительный вклад в науку и практику их применения внесли такие ученые, как Н.И. Алиев, Н.Д. Торопцев, В.Я. Беспалов, М.Л. Костырев, А-З. Р. Джендубаев, В.С. Фришман, И.Г. Стрижков и др. Большой вклад в развитие защит асинхронных машин внесли: С.Л. Кужеков, М.Я. Клецель, В.Ф. Минаков, О.В. Кобзистый и др.

Однако имеется важная нерешенная проблема эксплуатации генераторов. В настоящее время чувствительных защит  $AA\Gamma$  не существует. Есть мнение, что в случае коротких замыканий (КЗ)  $AA\Gamma$  теряет возбуждение, и защита для него не требуется.

Известно, что в большинстве случаев (85-95 %) отказы асинхронных машин происходят из-за повреждения статорной обмотки. При этом более 90 % повреждений приходится на межвитковые замыкания. Замыкание небольшого количества витков статорной обмотки ААГ не должно существенно изменять основной магнитный поток машины, и, поэтому велика вероятность длительной работы ААГ с таким видом повреждения. Скрытый отказ, существующий в виде виткового замыкания, значительно снижает надежность автономного ААГ, как источника резервного питания.

В создании устройств защиты (УЗ) главная трудность заключается в том, что пока мало исследованы процессы при внутренних КЗ в обмотке статора ААГ и не определены информативные параметры или признаки, характеризующие соответствующие повреждения.

**Цель исследования** – повышение эксплуатационной надежности автономных асинхронных генераторов с емкостным самовозбуждением в электроус-

тановках сельскохозяйственного назначения путем применения защит ААГ при повреждениях в статорной обмотке.

#### Задачи исследования:

- разработать математическую модель витковых коротких замыканий в обмотке статора автономного асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением;
- провести экспериментальные исследования повреждений в обмотке статора автономного асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением;
- разработать устройства защиты автономного асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением.

**Объект исследования** – автономный асинхронный генератор с емкостным самовозбуждением.

**Научная гипотеза.** В случае витковых КЗ в статорной обмотке ААГ не теряет возбуждения и продолжает питать нагрузку, в КЗ витках циркулирует ток, превышающий номинальный, что может стать причиной отказа.

**Предмет исследования** – витковые и межфазные повреждения обмотки статора автономного асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением.

**Методы исследования:** математическое моделирование, планирование эксперимента, спектральный анализ, численное решение дифференциальных уравнений.

# Научную новизну работы составляют:

- математическая модель автономного асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением при витковых КЗ в обмотке статора на базе системы дифференциальных уравнений;
- результаты экспериментального исследования повреждений в обмотке статора автономного асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением;
- построение устройств защиты автономного асинхронного генератора с использованием полученных информационных признаков повреждений;
- экономическое обоснование эффективности использования устройства защиты автономного асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением.

**Практическая ценность работы.** Разработанные компьютерные программы моделирования витковых КЗ в обмотке статора ААГ позволяют установить диапазон изменения переменных электромагнитных величин, прогнозировать развитие процессов в генераторе и определить целесообразность применения различных защитных устройств.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить характерные признаки повреждений обмотки статора ААГ при витковых и межфазных коротких замыканиях. Разработаны устройства защиты и диагностики ААГ с емкостным самовозбуждением при таких повреждениях. Проведенные экономические расчеты позволили определить возможную область эффективного использования устройств защиты автономного асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением в электроустановках сельскохозяйственного назначения.

## На защиту выносятся следующие основные положения диссертации:

- математическая модель автономного асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением при симметричных и несимметричных витковых КЗ в обмотке статора;
- предложения по использованию изменений в величинах и гармоническом составе токов ААГ для создания его защит, полученные на основе экспериментального исследования повреждений в обмотке статора автономного асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением;
- технические решения в области устройства защиты и диагностики автономного асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением при повреждениях в обмотке статора.

# Реализация и внедрение результатов работы.

Материалы диссертационных исследований внедрены в учебный процесс.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научной конференции факультетов механизации и электрификации в КубГАУ в 2005 г. (г. Краснодар); XXVIII сессии семинара «Диаг-

ностика энергооборудования» в ЮРГТУ в 2006 (г. Новочеркасск); на 8-й Регион. научн.-практ. конф. молод. ученых в КубГАУ в 2006 г. (г. Краснодар); на Международной научно-технической конференции в 2006 г. в БГАТУ (г. Минск); на Международной научно-практической конференции в КубГТУ в 2007 г. (г. Краснодар).

**Публикации результатов работы.** По теме диссертационной работы опубликованы 17 научных трудов, включая 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, получено 2 патента РФ на изобретение и один патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация включает: введение, четыре главы, общие выводы, список литературы и приложения. Работа изложена на 153 страницах, включая 59 рисунков, 14 таблиц, библиографический список из 100 наименований и 30 страниц приложений.

**Во введении** раскрывается актуальность диссертационной работы, сформулированы цель работы, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены: классификация, область применения, особенности эксплуатации асинхронных генераторов в сельском хозяйстве, а также анализ существующих устройств защиты генераторов.

Специфические условия эксплуатации электрических сетей вызывают большое число отказов их элементов. Отказы электрооборудования и перерывы в электроснабжении предприятий АПК влекут за собой как прямой экономический ущерб, связанный с его восстановлением, так и технологический, обусловленный порчей сельхозпродукции (например, массовой гибелью птицы). При этом аварии могут происходить как в линиях 6...10 кВ и 0,4 кВ, так и в резервном источнике электроснабжения, в качестве которого может использоваться ААГ.

В подавляющем большинстве случаев отказы асинхронных машин происходят из-за повреждения обмоток, при этом большинство повреждений приходится на замыкания между витками. Если ААГ не потеряет возбуждение при замыкании между витками и сохранит временную работоспособность, то надо считать, что он находится в состоянии скрытого отказа, выявление которого необходимо для обеспечения надежности резервного источника питания.

Защиты при таких повреждениях, в основном, строятся на изменениях: величин, фаз токов и их симметричных составляющих, гармонических составляющих токов и магнитных потоков рассеивания, вибрации. Применение односистемной схемы поперечной дифференциальной защиты требует наличия параллельных ветвей. Такие защиты применяются в основном для синхронных генераторов большой и средней мощности. Для асинхронных электродвигателей защиты часто выполняют на измерении несимметрии токов фаз. Если для ААГ небольшой мощности потребуется построение собственной защиты, то необходимо знать специфику процессов в нем в случае витковых и межфазных КЗ в обмотке статора. Выбору соответствующих информационных признаков при повреждениях в обмотке статора ААГ посвящены следующие главы работы.

**Во второй главе** разработана математическая модель самовозбуждающегося ААГ, а также математические модели ААГ с симметричными и несимметричными витковыми замыканиями в обмотке статора ААГ.

Для построения математической модели самовозбуждающегося ААГ и ААГ с симметричными трехфазными витковыми КЗ в обмотке статора ААГ (рисунок 1) рассмотрен предельный случай размагничивания, имеющий место при наличии КЗ контуров одновременно во всех трех фазах обмотки статора ААГ. Приняты традиционные допущения о симметрии машины (электрической, магнитной, пространственной), гладких цилиндрических поверхностях магнитопроводов статора и ротора, магнитной проницаемости стальных участков  $\mu = \infty$  и распределении МДС в зазоре по гармоническому закону. Вращающееся поле имеет круговую форму, то есть его амплитуда постоянна, а мгновенное значение частоты вращения за период неизменно, обмотка статора выполнена с числом параллельных ветвей, равным единице и одним элементарным проводником.

Дифференциальные уравнения ААГ в относительных величинах, включающие уравнения: тока и напряжения статора (  $\bar{i}_s$ ,  $\bar{u}_s$ ), потокосцепления ротора ( $\overline{\Psi}_r$ ), движения (угловая скорость ротора  $\overline{v}$ , момент приводного двигателя  $\overline{m}_c$ ,

относительный параметр  $\overline{T}_m$ ), внешней цепи для конденсаторов ( $\overline{c}$ ) и нагрузки (ток  $\overline{i}_H$  и индуктивность  $\overline{L}_H$ ), а также время  $\overline{t}$  и ток K3  $\overline{i}_{K3}$  в неподвижной комплексной системе координат ( $\alpha, \beta$ ) имеют вид (1).

$$\begin{cases} \frac{d\overline{i}_{s\alpha}}{d\overline{t}} = \frac{\overline{u}_{s\alpha}}{x_s'} - \frac{r\overline{i}_{s\alpha}}{x_s'} + \frac{k_r}{x_s'} \overline{T}_r \overline{\Psi}_{r\alpha} + \frac{k_r}{x_s'} pv \overline{\Psi}_{r\beta}, \\ \frac{d\overline{i}_{s\beta}}{d\overline{t}} = \frac{\overline{u}_{s\beta}}{x_s'} - \frac{r\overline{i}_{s\beta}}{x_s'} + \frac{k_r}{x_s'} \overline{T}_r \overline{\Psi}_{r\beta} - \frac{k_r}{x_s'} pv \overline{\Psi}_{r\alpha}, \\ \frac{d\overline{\Psi}_{r\alpha}}{d\overline{t}} = k_r r_r \overline{i}_{s\alpha} + k_r _1 r_r \overline{i}_{K3\alpha} - \frac{1}{\overline{T}_r} \overline{\Psi}_{r\alpha} - pv \overline{\Psi}_{r\beta}, \\ \frac{d\overline{\Psi}_{r\beta}}{d\overline{t}} = k_r r_r \overline{i}_{s\beta} + k_r _1 r_r \overline{i}_{K3\beta} - \frac{1}{\overline{T}_r} \overline{\Psi}_{r\beta} + pv \overline{\Psi}_{r\alpha}, \\ \frac{dv}{dt} = \frac{k_r \left(\overline{\Psi}_{r\alpha} \overline{i}_{s\beta} - \overline{\Psi}_{r\beta} \overline{i}_{s\alpha}\right)}{\overline{T}_m} + \frac{k_r _1 \left(\overline{\Psi}_{r\alpha} \overline{i}_{K3\beta} - \overline{\Psi}_{r\beta} \overline{i}_{K3\alpha}\right)}{\overline{T}_m} - \frac{\overline{m}_c}{\overline{T}_m}, \\ \frac{d\overline{i}_{H\alpha}}{d\overline{t}} = \frac{\overline{u}_{s\alpha} - \overline{i}_{H\alpha} \overline{r}_H}{\overline{L}_H}, \\ \frac{d\overline{u}_{s\beta}}{d\overline{t}} = \frac{\overline{u}_{s\beta} - \overline{i}_{H\beta}}{\overline{c}}, \\ \frac{d\overline{u}_{s\beta}}{d\overline{t}} = \frac{\overline{i}_{s\beta} - \overline{i}_{H\beta}}{\overline{c}}, \\ \frac{d\overline{u}_{s\beta}}{d\overline{t}} = -\frac{r_k _1 \overline{i}_{K3\alpha}}{x_s'_k} + \frac{k_{r1}}{\overline{T}_r x_{s'k}'} \overline{\Psi}_{r\alpha} + \frac{k_{r1}}{x_{s'k}'} pv \overline{\Psi}_{r\beta}, \\ \frac{d\overline{i}_{K3\beta}}{d\overline{t}} = -\frac{r_k _1 \overline{i}_{K3\beta}}{x_{s'k}'} + \frac{k_{r1}}{\overline{T}_r x_{s'k}'} \overline{\Psi}_{r\beta} - \frac{k_{r1}}{x_{s'k}'} pv \overline{\Psi}_{r\alpha}. \end{cases}$$

Безразмерные коэффициенты:

$$x'_{s} = \left(x_{s} - \frac{x_{m}^{2}}{x_{r}}\right), k_{r} = \frac{x_{m}}{x_{r}}, \overline{T}_{r} = \frac{x_{r}}{r_{r}}, r = \left(r_{s} + k_{r}^{2}r_{r}\right),$$
 (2)

$$r_k = r \cdot W + r_{prov}, \ x'_{sk} = x'_s \cdot W^2, \ k_{r1} = k_r \cdot W,$$
 (3)

где  ${\,{\rm x}_{\,{\rm S}}},\,\,{\rm x}_{\,{\rm r}},\,\,{\rm x}_{\,{\rm m}},\,\,{\rm r}_{\,{\rm r}},\,{\rm r}_{\,{\rm S}}$  – относительные параметры;

 $W\,$  – число замкнутых витков по отношению к числу витков в фазе;

r<sub>prov</sub> – сопротивление короткозамкнутого контура.

В качестве базовых величин приняты амплитудные номинальные значения фазного напряжения, тока, а также номинальные значения угловой частоты и момента.

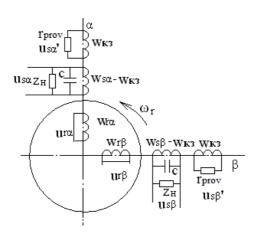


Рисунок 1- Модель ААГ для исследования симметричных витковых КЗ в неподвижной α-β системе координат

Результаты расчетов системы (1) с помощью пакета MathCAD и соответствующие осциллограммы, полученные экспериментально, изменения фазного тока при самовозбуждении ААГ и тока в поврежденной фазе, а также тока КЗ при замыкании 3 % витков в каждой фазе при номинальной емкости, показаны на рисунке 2. На данном рисунке видно, что при витковом КЗ ток в поврежденной фазе уменьшается в 1,2 раза, а в замкнувшихся витках ток превышает номинальный в шесть раз. Сравнение моделирования и эксперимента показало, что кривые отличаются на 3-5 %, это подтверждает адекватность математической модели.

Решение системы дифференциальных уравнений	Осциллограммы токов (эксперимент)
Ток статора при пуске ААГ	Ток статора при пуске ААГ
8,95A 0 V V V 0,2 V 0,4 V V 1, t,c	8,9A 0 0,2 0,4 t,c
Ток статора при трехфазном	Ток статора при трехфазном
симметричном КЗ	симметричном КЗ
8,9A K3 7,6A	8,9A 7,56A 0,0200,400,600,8 t,c
Ток КЗ при трехфазном	Ток КЗ при трехфазном
симметричном КЗ	симметричном КЗ
K3 54,4A 54,4A 616 6,8 t,c	, K3 ,54A b 0/2 0/4 0/6 0/8 t.c

Рисунок 2 – Проверка адекватности математической модели ААГ

Для анализа несимметричных витковых замыканий в обмотке статора ААГ разработана математическая модель на основе системы дифференциальных уравнений в фазных  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  координатных осях для реальных величин статора (рисунок 3).

Для записи уравнений потокосцепления в матричном виде введем вектор токов:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_{S\alpha''} & i_{S\alpha'} & i_{S\beta'} & i_{S\gamma'} & i_{r\alpha} & i_{r\beta} & i_{r\gamma} \end{bmatrix} \Gamma. \tag{4}$$

Также необходимо записать матрицу индуктивностей:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{s\alpha''} & M_{s\alpha''s\alpha'} & M_{s\alpha''s\beta'} & M_{s\alpha''s\gamma'} & M_{s\alpha''r\alpha} & M_{s\alpha'r\beta} & M_{s\alpha'r\gamma} \\ M_{s\alpha's\alpha''} & L_{s\alpha'} & M_{s\alpha's\beta'} & M_{s\alpha's\gamma'} & M_{s\alpha'r\alpha} & M_{s\alpha'r\beta} & M_{s\alpha'r\gamma} \\ M_{s\beta's\alpha''} & M_{s\beta's\alpha'} & L_{s\beta'} & M_{s\beta's\gamma'} & M_{s\beta'r\alpha} & M_{s\beta'r\beta} & M_{s\beta'r\gamma} \\ M_{s\gamma's\alpha''} & M_{s\gamma's\alpha'} & M_{s\gamma's\beta'} & L_{s\gamma'} & M_{s\gamma'r\alpha} & M_{s\gamma'r\beta} & M_{s\gamma'r\gamma} \\ M_{r\alpha s\alpha''} & M_{r\alpha s\alpha'} & M_{r\alpha s\beta'} & M_{r\alpha s\gamma'} & L_{r\alpha} & M_{r\alpha r\beta} & M_{r\alpha r\gamma} \\ M_{r\beta s\alpha''} & M_{r\beta s\alpha'} & M_{r\beta s\beta'} & M_{r\beta s\gamma'} & M_{r\beta r\alpha} & L_{r\beta} & M_{r\beta r\gamma} \\ M_{r\gamma s\alpha''} & M_{r\gamma s\alpha'} & M_{r\gamma s\beta'} & M_{r\gamma s\gamma'} & M_{r\gamma r\alpha} & M_{r\gamma r\beta} & L_{r\gamma} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Матричное выражение потокосцеплений статора и ротора:

$$\Psi = \mathbf{L} \cdot \mathbf{I} \,. \tag{6}$$

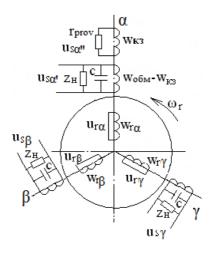


Рисунок 3 - Модель ААГ для расчета несимметричных витковых К3 в фазной  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  системе координат

Математическая модель несимметричных витковых коротких замыканий в обмотке статора позволяет рассчитать токи и все необходимые характеристики электромеханической системы с ААГ. Однако практическая реализация данной модели сложна из-за необходимости определения взаимных индуктивностей обмоток. Поэтому для анализа данных повреждений приоритет целесообразно отдать экспериментальным исследованиям.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований повреждений ААГ. Определены степень и характер влияния повреждений в обмотке статора на величины токов и напряжений в фазных обмотках, токов емкостей самовозбуждения и токов нагрузки, а также на вибрацию ААГ.

Экспериментальная установка с ААГ, выполненная на базе асинхронного электродвигателя (АД) с КЗ ротором типа 4А100S4УЗ (3 кВт, 1435 об/мин), показана на рисунке 4. Искусственные замыкания между различными витками в фазных обмотках ААГ создавались с помощью специальных, предварительно выведенных наружу из лобовой части обмотки статора, выводов. Изменение вибрации фиксировалось с помощью датчика, прикрепленного к корпусу генератора.

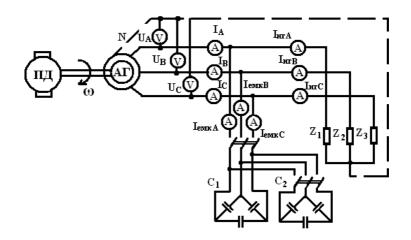


Рисунок 4 — Схема экспериментальной установки: А $\Gamma$  — асинхронный генератор; П $\mathcal{I}$  — приводной двигатель;  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  — сопротивления нагрузки.

Привод ААГ может быть различным. В частности его приводом может быть ветроустановка. Её характеристика момента не обладает жесткостью. Поэтому в экспериментальной установке использовалось два варианта привода: асинхронный двигатель (АД) (система с «жестким» приводом,  $\omega \approx \text{const}$ ) и дви-

гатель постоянного тока (ДПТ) с изменяемой в некоторых пределах угловой скоростью («не жесткая» система,  $\omega = var$ ). В обозначения величин получаемых параметров ААГ при повреждениях для  $\omega \approx const$  используется цифра «1», а для  $\omega = var$  - цифра «2».

Экспериментами с ААГ полностью подтверждена гипотеза о том, что в случае витковых замыканий в части обмотки циркулирует достаточно большой ток, способный вызвать повреждение статорной обмотки генератора. Кривые токов коротко замкнутой части обмотки (КЗ вмтков) в зависимости от числа замкнувшихся витков и осциллограмма тока КЗ показаны на рисунках 5 и 6 соответственно. Для ААГ, питающего нагрузку, по мере увеличения числа КЗ витков с 1 % до 30% ток в этих витках изменяется с 1,7  $I_{\text{HOM}}$  до 4  $I_{\text{HOM}}$  для  $\omega$  = const и с 2  $I_{\text{HOM}}$  до 2,8  $I_{\text{HOM}}$  для  $\omega$  = var . Максимальный ток замкнувшихся витков превышает номинальный в 5 - 7 раз и наблюдается примерно при 3 % КЗ витков. При увеличении числа КЗ витков до 25 — 35 % ААГ теряет возбуждение и все токи прекращаются.

В случае 15 % КЗ витков фазные, емкостные токи, напряжения в поврежденной фазе уменьшаются в 1,3 раза (привод  $\omega$  = const и чисто активная нагрузка) (рисунок 6). Коэффициент обратной последовательности для фазных, емкостных токов и фазных напряжений имеет величину менее 0,1. Разница между средними значениями токов и напряжений фаз при 15 % КЗ витков, и токами и напряжениями в поврежденной фазе, по отношению к номинальным величинам, будет соответственно 0,04  $I_{HOM}$  и 0,07  $U_{HOM}$ . Ток нагрузки в поврежденной фазе в этом случае уменьшается в 1,1 раза. Коэффициент обратной последовательности имеет величину менее 0,05.

Подобные процессы происходят и при обрыве, и несимметрии емкостей самовозбуждения, и обрыве фаз ААГ, а также в случае межфазных и трехфазных КЗ. При замыкании 3 % и 15 % витков в двух фазах, соответственно, уменьшение токов в фазах аналогично уменьшению при витковых КЗ, ток в короткозамкнутых витках в 4,6 раз больше номинального.

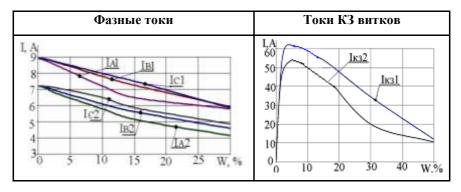


Рисунок 5 – Кривые изменения фазных токов и тока КЗ витков ААГ

15% КЗ витков ток КЗ	15 % КЗ витков ток фазы «А»	3 % КЗ витков ток фазы «А»
K3 55A 55A 55A 6 0,2 0,4 0,6 0,8 t,c	8,9A <sub>K3</sub> 6,8A 6 0.2 0.4 0.6 0.8t.c	8,9A 8,8A 0 0,2 0,4 0,6 0,8 t,4
активно-индуктивная нагрузка ток фазы «А»	Обрыв емкости ток фазы «А»	15% КЗ витков амплитуда вибрации
8,9A <sub>K3</sub> 6A 0 0,2 0,4 0,6 0,8t,c	8,9A—Обрыв 2,1A 0 0,2 0,4 0,6 0,8t,с	10 0,2 0,4 0,6 0,8t,c

Рисунок 6 – Фазный ток, ток КЗ и амплитуда вибрации  $AA\Gamma$ 

На рисунке 7 показано изменение спектра фазного тока в поврежденной фазе и спектра сигнала, получаемого от датчика вибрации. По оси абсцисс указана частота тока в Гц, по оси ординат указана шкала в относительных единицах К:

$$K = \frac{I_{\varphi \nu = n}}{I_{\varphi \nu = 1}}, \tag{7}$$

где  $I_{\varphi\nu=n}$  – величина тока n-й гармоники;

 $I_{\varphi\,\nu=1} \ - \ \mbox{величина тока 1-й гармоники, соответствующая нормальной ра- \\$  боте  $AA\Gamma$  при номинальных параметрах.

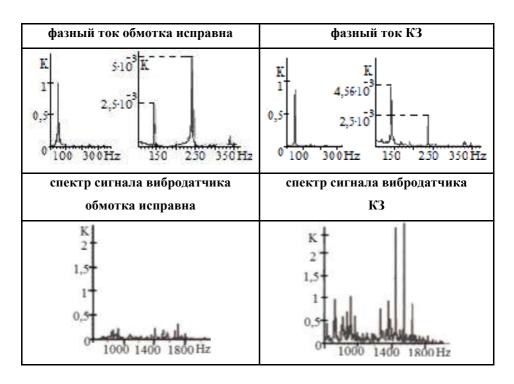


Рисунок 7 - Спектральный состав при 15 % КЗ витков в фазе «А»

В ходе проведения экспериментальных исследований установлено, что при 15 % КЗ витков наблюдается уменьшение первой, пятой и седьмой гармоник фазных и емкостных токов в поврежденной фазе соответственно в 1,15, 2,15 и 2,9 раз, а также рост третьей гармоники в 1,9 раз.

Для фазных напряжений происходит уменьшение первой, третьей, пятой и седьмой гармоник в поврежденной фазе соответственно в 1,53, 1,68, 1,43 и 1,1 раза.

Подобно напряжению происходит уменьшение данных гармоник тока нагрузки, но в 1,4 раз меньше. В целом же была установлена несимметрия гармонических составляющих, аналогичная несимметрии токов и напряжений в фазах.

Аналогичный характер имеет изменение гармонических составляющих в неповрежденных фазах. Изменение гармонических составляющих токов и напряжений в случае межфазных и трехфазных несимметричных КЗ аналогично изменению при витковых КЗ. При симметричном трехфазном КЗ наблюдается рост первой гармоники фазных и емкостных токов в 1,25 раз. Третья, пятая и седьмая гармоники уменьшаются в 2,8, 1,5 и 1,1 раз. Аналогичные соотношения получены для фазных напряжений, однако в данном случае первая гармоника уменьшается, а третья возрастает. Гармонические составляющие для токов нагрузки уменьшаются подобно напряжению, но в 1,4 раз меньше.

С помощью планирования эксперимента получены аналитические уравнения связи числа КЗ витков в статорной обмотке с основными параметрами ААГ. При проведении многофакторного эксперимента было выбрано три фактора, оказывающих существенное влияние на процесс:

фактор X1 – число К3 витков в поврежденной фазе (фазах), считая от нулевых выводов в %;

фактор X2 – емкость цепи самовозбуждения (мкФ);

фактор X3 – нагрузка цепи генератора (  $p_{H\Gamma} \, / \, p_{HOM}$  ).

В качестве нижнего и верхнего уровней фактора X1 были приняты значения 3% и 15% соответственно. Для фактора X2 соответственно значения 30% и 70% номинальной емкости. Для X3 приняты значения 0,2 и 0,5. Коэффициенты уравнений регрессии были рассчитаны с учетом однородности дисперсий по критерию Кохрена, адекватность модели проверена по F – критерию Фишера. Уравнения для витковых К3 имеют вид:

- ток поврежденной фазы

$$I_{A1} = 6,16 - 0,951 \cdot X1 + 1,572 \cdot X2 - 0,149 \cdot X3,$$
 (8)

$$I_{A2} = 4,87 - 0,864 \cdot X1 + 0,892 \cdot X2 + 0,228 \cdot X3,$$
 (9)

- ток нагрузки

$$I_{H\Gamma A 1} = 0.737 - 0.07 \cdot X1 + 0.047 \cdot X2 + 0.370 \cdot X3, \tag{10}$$

$$I_{H\Gamma A 2} = 0.674 - 0.08 \cdot X1 + 0.022 \cdot X2 + 0.348 \cdot X3, \tag{11}$$

- ток замкнувшихся витков

$$I_{K31} = 51,782 - 4,658 \cdot X1 + 5,302 \cdot X2 - 0,548 \cdot X3,$$
 (12)

$$I_{K32} = 49,894 - 1,274 \cdot X1 - 1,343 \cdot X2 - 3,857 \cdot X3, \tag{13}$$

- число оборотов генератора

$$n_1 = 1246 - 7 \cdot X1 - 11,25 \cdot X2,$$
 (14)

$$n_2 = 1095 - 2.5 \cdot X1 - 60 \cdot X2 + 20 \cdot X3. \tag{15}$$

Анализ вышеприведенных уравнений показывает следующее. В случае привода от АД, в отличие от привода от ДПТ, с увеличением нагрузки ток в поврежденной фазе уменьшается. С увеличением емкости самовозбуждения ток в поврежденной фазе увеличивается. При увеличении числа КЗ витков происходит уменьшение токов в фазе. Подобным образом изменяются также емкостный ток и фазное напряжение. Ток нагрузки для обоих видов приводов ведет себя подобно фазному току для привода с ДПТ. Аналогичный характер имеют зависимости тока в установившемся режиме для неповрежденных фаз. Ток КЗ в случае привода от АД с увеличением емкости самовозбуждения растет, в отличие от привода генератора от ДПТ. В случае межфазных КЗ уравнения регрессии имеют вид подобный витковым замыканиям. Отличие состоит в том, что токи КЗ в обоих случаях при возрастании емкости самовозбуждения увеличиваются.

При витковых К3, с увеличением числа замкнутых витков и емкости самовозбуждения, обороты генератора ( $n_1, n_2$ ) падают. С увеличением нагрузки в случае привода от ДПТ обороты увеличиваются. Аналогичный характер имеют процессы в случае межфазных К3. В случае трехфазных К3 для привода ААГ от

ДПТ с увеличением числа КЗ витков обороты уменьшаются, а в случае привода генератора от АД – возрастают.

Исследования вибрации корпуса ААГ показали, что при КЗ в статорной обмотке гармонические составляющие сигнала вибродатчика увеличиваются в 4-8 раз (в области 600-1500 Гц). Аналогичные процессы происходят при обрыве фаз ААГ и емкостей самовозбуждения. При малом числе КЗ витков изменение гармоник незначительно (1-4%). Данный признак позволяет обнаруживать не только электрические, но и механические повреждения, поэтому его целесообразно использовать для построения устройства защиты ААГ.

**В четвертой главе** описываются предлагаемые устройства защиты ААГ, а также технико-экономическое обоснование применения устройства защиты.

Для защиты ААГ от внутренних межфазных КЗ в обмотке статора, вблизи нулевых выводов, разработано устройство дифференциально-фазной защиты согласно пат. № 2313890 РФ RU, работа которого основана на измерении токов фаз в случае КЗ. Разработано устройство дифференциальной защиты ААГ (Пат. № 66127 РФ RU), работа которого основана на измерении токов в нулевых, фазных выводах и присоединении емкостей.

В качестве чувствительного устройства защиты, позволяющего определять и витковые замыкания обмоток статора ААГ, предлагается использовать устройство, основанное на использовании вибродатчика, который крепится на корпусе генератора (Пат. № 2295815 РФ RU).

На рисунке 8 показана принципиальная схема управления и защиты ААГ. При возникновении виткового КЗ в обмотке статора и при неисправности подшипников появляются дополнительные колебания корпуса машины 1, и сигнал вибродатчика 2 превышает пороговое значение. Сигнал на выходе блока сравнения 5 усиливается в 6 и вызывает срабатывание 7. Исполнительный механизм 7 приводит в действие привод аварийного отключения выключателя 4, который отключает ААГ. Блок питания 8 обеспечивает работу блоков 5 и 6. Блоки 5, 6, 7 и 8 в совокупности составляют устройство защиты 3.

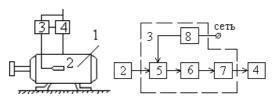


Рисунок 8 – Схема управления и защиты ААГ

Экономический эффект от использования защиты ААГ достигается за счет снижения технологического ущерба, связанного с недополучением прибыли из-за простоя системы вентиляции птичника. Снижение ущерба достигается за счет увеличения коэффициента готовности ААГ, используемого для резервирования питания. Расчетный дисконтированный доход на птичник составляет 17728 руб. Срок окупаемости устройства защиты ААГ составляет 0,8 года.

#### Обшие выводы

1 Установлено, что при наличии в статорной обмотке ААГ 3-15 % короткозамкнутых витков он не теряет возбуждения и продолжает питать нагрузку. При этом ток в КЗ витках превышает номинальный в 4-7 раз. Поэтому для ААГ необходимо построение устройств диагностики и защиты, так как их отсутствие может стать причиной скрытых отказов.

- 2. Разработана математическая модель ААГ с витковыми КЗ в статорной обмотке. С помощью расчетов на полученной математической модели подтверждены результаты эксперимента. Кривые токов и напряжений, полученные расчетом на математической модели, согласуются с реальными осциллограммами (расхождение в пределах 3-5%), что подтверждает адекватность математической модели. Разработанные компьютерные программы позволяют прогнозировать развитие процессов в генераторе и определить целесообразность применения различных защитных устройств.
- 3. Изменение токов и напряжений ААГ при несимметричных витковых замыканиях проанализировано на основе планирования эксперимента. Получены уравнения регрессии, позволяющие определять токи, напряжения и другие пара-

метры  $AA\Gamma$  от числа K3 витков в статорной обмотке, емкости самовозбуждения, величины нагрузки  $AA\Gamma$ .

- 4. Экспериментально установлено, что при витковых, межфазных и трехфазных КЗ наибольшие изменения наблюдаются для первой, третьей, пятой и седьмой гармонических составляющих. В среднем при 15 % КЗ витков в поврежденной фазе гармоники в токах изменяются в два раза (увеличиваются при увеличении числа КЗ витков).
- 5. Показано, что в случае витковых КЗ в статорной обмотке ААГ несимметрия токов, напряжений и величина их гармонических составляющих не велики (коэффициент обратной последовательности не превышает величину 0,1). Данная несимметрия сравнима с несимметрией в цепи нагрузки генератора, поэтому построение защит, реагирующих на несимметрию токов и напряжений, затруднительно. Однако при КЗ в статорной обмотке ААГ гармонические составляющие сигнала вибродатчика, установленного на корпусе генератора увеличиваются в 4 − 8 раз. На основании данного признака построено устройство защиты по пат. № 2295815 РФ RU.
- 6. Для защиты ААГ от внутренних межфазных КЗ в обмотке статора, вблизи нулевых выводов, разработано устройство дифференциально-фазной защиты согласно пат. № 2313890 РФ RU и устройство дифференциальной защиты ААГ (пат. № 66127 РФ RU).
- 7. Экономический эффект от использования защиты ААГ достигается за счет снижения технологического ущерба, которое достигается за счет увеличения коэффициента готовности ААГ, используемого для резервирования питания. Чистый дисконтированный доход составляет 17728 руб. Срок окупаемости устройства защиты генератора составляет 0,8 года.

# Основное содержание диссертации опубликовано: в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Соболь, А.Н. Сравнение методов расчета однофазных КЗ в электроустановках до 1 кВ / А.Н. Соболь А.В. Богдан, В.А. Богдан, В.В. Савиных // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 2004. — № 11. — С. 30 — 31.

- 2. Соболь, А.Н. Признаки повреждения обмотки статора асинхронного генератора / А.Н. Соболь А.В. Богдан, И.А. Потапенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2007. N = 8. C. 13 14.
- 3. Соболь, А.Н. Токи повреждений в обмотках асинхронных генераторов с емкостным самовозбуждением / А.Н. Соболь А.В. Богдан // Кибернетика энергетических систем: материалы XXVIII сессии семинара «Диагностика энергооборудования» / ЮРГТУ. Новочеркасск, 2006 / Ред. журн. «Изв. вузов Электромеханика». 2006. С. 170 171.
- 4. Пат. № 2313890 РФ RU, МПК 51 Н02М 7/08, Н02Н 3/28. Устройство для дифференциально-фазной защиты / ФГОУ ВПО КубГАУ авт.А.В. Богдан, А.Н. Соболь. № 2006124282; заявл. 06.07.2006; опубл. 27.12.2007, Бюл. № 36.
- 5. Пат. № 2295815 РФ RU, МПК 51 Н02Н 7/08, G01М 15/00, H02К 15/00. Устройство защиты машин переменного тока / ФГОУ ВПО КубГАУ авт.А.В. Богдан, И.Г. Стрижков, И.А. Потапенко, А.Н. Соболь. — № 2005131150; заявл. 07.10.2005; опубл. 20.03.2007, Бюл. № 8.
- 6. Пат. № 66127 РФ RU, МПК 51 H02K 11/00, H02H 7/08. Устройство для дифференциальной защиты асинхронного генератора / ФГОУ ВПО КубГАУ авт. А.Н. Соболь. № 2006147115; заявл. 27.12.2006; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 24.

# Публикации в других изданиях:

- 7. Соболь, А.Н. Анализ неисправностей асинхронного генератора / А.Н. Соболь // Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе: сборник научных трудов / СГАУ. Ставрополь, 2007. С. 177 178.
- 8. Соболь, А.Н. Анализ повреждений в обмотках асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением / А.Н. Соболь, А.В. Богдан // Перспективы и направления развития энергетики АПК: материалы Международной научнотехнической конференции / БГАТУ. Минск, 2006. С. 40 42.
- 9. Соболь, А.Н. Анализ токов при витковых замыканиях в обмотке статора асинхронного генератора с помощью теории планирования эксперимента / А.Н. Соболь // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: материалы

- 8-й Регион. научн.-практ. конф. молод. ученых. Краснодар: Куб $\Gamma$ АУ, 2006. С. 336 337.
- 10. Соболь, А.Н. Защита при витковых замыканиях в обмотке статора асинхронных генераторов с емкостным возбуждением / А.Н. Соболь, А.В. Богдан, А.И. Богдан, М.М. Ключников // Энергосберегающие комплексы и системы: материалы Международной научно-практической конференции / КубГТУ. Краснодар, 2006. С. 192 196.
- 11. Соболь, А.Н. Использование методов расчета однофазных КЗ в электроустановках АПК / А.Н. Соболь, А.В. Богдан, В.В. Савиных // Энерго- и ресурсосберегающие технологии и установки: материалы 4-й научной конференции факультетов механизации и электрификации / КубГАУ. Краснодар, 2005. С. 115 11
- 12. Соболь, А.Н. Математическая модель асинхронного генератора при витковых замыканиях в фазных осях статора / А.Н. Соболь, А.В. Богдан // Энергосберегающие комплексы и системы: материалы Международной научнопрактической конференции / КубГТУ. Краснодар, 2007. С. 159 162.
- 13. Соболь, А.Н. Математическая модель асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением / А.Н. Соболь, А.В. Богдан // Энергосберегающие комплексы и системы: материалы Международной научно-практической конференции / КубГТУ. Краснодар, 2006. С. 185 189.
- 14. Соболь, А.Н. Особенности эксплуатации асинхронных генераторов в сельском хозяйстве / А.Н. Соболь // Энерго- и ресурсосберегающие технологии и установки: материалы пятой Всероссийской научной конференции. Сборник материалов. Краснодар: КВВАУЛ, 2007 г. С. 161 164.
- 15. Соболь, А.Н. Применение теории планирования эксперимента для анализа повреждений в статорной обмотке асинхронного генератора / А.Н. Соболь, А.В. Богдан // Энергосберегающие комплексы и системы: материалы Международной научно-практической конференции / КубГТУ. Краснодар, 2007. С. 154 158.

- 16. Соболь, А.Н. Токи при коротком замыкании витков в статорной обмотке асинхронного двигателя и генератора / А.Н. Соболь // Энергосберегающие технологии, оборудование и источники электропитания для АПК / КубГАУ. Краснодар, 2005.-C.276-278.
- 17. Соболь, А. Н. Трехфазные короткие замыкания в обмотке статора асинхронного генератора / А.Н. Соболь, А.В. Богдан // Электроэнергетические комплексы и системы: материалы Международной научно-практической конференции / КубГТУ. Краснодар, 2005. С. 150-153.

Подписано в печать «» ноября 2010 г	Формат $60x84 \frac{1}{16}$
Бумага офсетная	Офсетная печать
Печ. л. 1	Заказ №
Тираж 100 экз.	

Отпечатано в типографии КубГАУ 350044, Краснодар, ул. Калинина, 13