

зерттеуге мүмкіндік береді. Осы кезде күй жағдайының айнымалысы ретінде ток қабылданған.

Сандық тәжірибелер арқылы математикалық моделі арқылы электр жетек жүйесіндегі өтпелі үрдістердің талдауы жүргізілді. Модельдеу жобаланған автономды электр жетек жүйесінің жұмыс істеу қабілеттілігін көрсетті.

Негізгі сөздер: автономды электр жетек, өтпелі үрдістер, синхронды генератор, асинхронды қозғалтқыш, модельдеу, математикалық моделі, дифференциалдық теңдеулер.

Shynybay Zh.S., Yessimkhanov S.B., Karamurzin R.M.

THEORETICAL RESEARCH TRANSIENTS IN INDEPENDENT ELECTRIC DRIVE

Abstract

Differential equations composed of a synchronous generator and induction motor, as well as the coupling equations that take into account the parameters of connecting cables.

In relative terms drawn up a system of equations of transients autonomous electric system, which allows to study the dynamics of the system in various modes. Thus for the current state variable passed.

By conducting numerical experiments using mathematical model analysis of transients in the motor drive system. The simulation showed capacity designed system of autonomous asynchronous electric.

Keywords: self-contained electric, transients, synchronous generator, induction motor, simulation, mathematical model, differential equations.

УДК 621. 313.3

Шыныбай Ж.С., Есимханов С.Б., Карамурзин Р.М.

*Казахский национальный аграрный университет, Алматы
Костанайский государственный университет им. А. Байтурсынова*

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И УСТАНОВОК

Аннотация

В статье приводятся сведения об оптимизации параметров синхронных генераторов повышенной частоты. Исследованы закономерности, которые при увеличении частоты вращения влияют на параметры и технические показатели синхронных генераторов повышенной частоты. Составлены методики расчетов масс и стоимостей составляющих элементов синхронного генератора.

Ключевые слова: автономная энергетическая система, синхронный генератор, частота тока, масса электрических машин, стоимость генератора.

Введение

Уже в конце 50-х началось, а в 60-х – 70-х годах получило широкое распространение применение переменного тока частотой 200 и 400Гц в лесоразработках, сельскохо-

зайствованном производстве, авиационных электроэнергетических системах, в судовых и других автономных установках, для различных систем и устройств [1, 2].

Наибольшее распространение имеют два типа синхронных генераторов – «обычные» синхронные переменного-полюсные машины с обмоткой возбуждения, расположенной на роторе, и индукторные генераторы с неподвижной обмоткой возбуждения, расположенной вне ротора. Для генерирования электроэнергии с частотой 400...500 Гц используются оба типа генераторов, каждому из которых соответствует своя предпочтительная область применения, обусловленная свойствами этих машин.

Опыт создания машин повышенной частоты показывает, что при частоте 400 Гц обычные переменного-полюсные генераторы, особенно быстроходные (при частоте вращения 6000...8000 об/мин), по своим основным характеристикам получают лучше индукторных машин, за исключением машин малых мощностей. В машинах малых мощностей (до 20 кВА) и при частоте вращения менее 3000 об/мин при $2p \geq 16$ полюсное деление $\tau = \pi D / 2p$ получается настолько малым, что не позволяет создать рациональную конструкцию машины в нормальном переменного-полюсном исполнении с приемлемыми массогабаритными характеристиками. У синхронных генераторов, повышение частоты выходного напряжения достигается за счет увеличения числа полюсов при неизменной частоте вращения. Так при значительном увеличении числа полюсов у генераторов относительно небольшой мощности, оптимальные размеры спинки паза определяются не по значению магнитного потока, а исходя из требований механической прочности изготовления жесткой; повышения потерь и, связанная с этим необходимость уменьшения индукции и отчасти линейной нагрузки, приводят к увеличению размеров машин [3, 4].

Поэтому основной тип генераторов, в частности в судовых установках, синхронные генераторы на 400 Гц с постоянным числом пар полюсов ($2p = const$), у которых частота выходного напряжения повышается за счет соответствующего увеличения частоты вращения генератора. В таком случае габариты и масса синхронных генераторов резко уменьшаются.

Материалы и методы исследований

С целью определения оптимального значения частоты напряжения генератора, обеспечивающего минимальную суммарную массу генератора и редуктора, при постоянной величине скорости первичного двигателя, к которому подключается генератор, нами была отлажена методика расчета явнополюсного генератора повышенной частоты, при этом за основу взята методика расчета синхронных генераторов с радиальными полюсами, с классической магнитной системой, предложенная В.А.Балагуровым [6].

Проектировочный расчет синхронного генератора включает: определение главных размеров; расчет обмотки, пазов и спинки якоря; определение размеров магнитной цепи индуктора, демпферной клетки; определение МДС обмотки возбуждения при двойной перегрузке; расчет МДС спинки якоря; расчет обмотки возбуждения; расчет номинального режима; расчет режима холостого хода; определение массы генератора; определение потерь и к.п.д. основного генератора в номинальном режиме [6].

Расчет проводился для ряда мощностей и частот напряжения синхронного генератора с уточнением отдельных коэффициентов для каждого случая.

В целом налаженная методика расчета синхронных генераторов, дает удовлетворительные результаты во всем диапазоне изменения мощности и частоты напряжения генератора. Составлен соответствующий алгоритм, на языке программирования Delfi Borland 6 составлена программа проекторочного расчета синхронного генератора.

Результаты исследований и их обсуждение

Возможность снижения активной массы и габаритов видна из рассмотрения уравнения «машинной постоянной» [5]

$$D^2 l = \frac{C}{BAS} \cdot \frac{P_H}{n}, \quad (1)$$

где D - диаметр ротора, принимаемый равным диаметру расточки статора; l - длина ротора (статора); B - магнитная индукция в воздушном зазоре; AS - линейная нагрузка; P_H - активная мощность, номинальная; n - частота вращения.

Г.И. Китаенко исследовал закономерности, которые при увеличении частоты вращения влияют на параметры и технические показатели таких генераторов повышенной частоты.

При сравнительных расчетах считалось, что суммарные электрические потери и их составляющие остаются неизменными. В этом случае, при равном объеме активных материалов и одинаковой геометрии активного ядра, потери (в единицах объемов меди и стали) не изменяются.

Электрические потери определяются зависимостью

$$\eta_{\Sigma} = \varphi(P_H) \approx \varphi(P_i), \quad (2)$$

где η_{Σ} - электрический коэффициент полезного действия (т. е. без учета механических потерь); P_i - электромагнитная активная мощность.

Тогда для потерь имеет соотношение

$$\sum \Delta P_f^* = P_{if}^{3/4} \sum \Delta P_{50}^*. \quad (3)$$

Здесь индексом $*$ обозначены величины, выраженные в относительных единицах, причем величины при частоте 50 Гц принимаются за единицу; все остальные, относящиеся к исходному генератору при частоте 50 Гц, обозначены индексом 50, а относящиеся к генератору повышенной частоты - индексом f .

Увеличение потерь, пропорциональные $P^{3/4}$ вытекает из условия (3) с учетом того, что мощность в геометрически подобных машинах растет пропорционально четвертой степени линейных размеров, а объем и потери в машине – пропорционально третьей степени. Это выражается коэффициентом использования активных материалов

$$K_V = \frac{P_H^{3/4}}{V_A}. \text{ В данном случае по условию объем активных материалов генераторов } V_A = \text{const}.$$

Для общего случая, при $\eta_{\Sigma} \neq \text{const}$, уравнение [3] можно записать как

$$\sum \Delta P_f^* \equiv P_{if}^k \sum \Delta P_{50}^*, \quad (4)$$

где $3/4 > k > 0$. Приняв за основу уравнение (1), Г.И. Китаенко после ряда преобразований получил выражение, определяющее зависимость между электромагнитной мощностью машины и частотой [3]

$$P_{if} = f^{0,25} P_{i50}. \quad (5)$$

Тогда при $k=0$

$$P_{if} = f^{0,25}, \quad (6)$$

или

$$\frac{P_{if}}{P_{i50}} = \left(\frac{f}{50}\right)^{0,25}, \quad (7)$$

В этом случае при $f=400\text{Гц}$

$$P_{i400} \approx 1,7 P_{i50}. \quad (8)$$

Потери в машине находятся на уровне потерь в исходной машине (на 50 Гц), т. е. теплоиспользование активных материалов будет на прежнем уровне, а к.п.д. машины повышенной частоты будет выше к.п.д. исходной машины. Таким образом, при $k=0$ мощность машины при 400 Гц увеличивается в 1,7 раза, а потери, отнесенные к единице мощности, снижаются в 1,7 раза, т. е. активные материалы здесь используются не полностью [4].

Для улучшения использования активных материалов необходимо, чтобы $k > 0$. При $k=3/4$ потери в активном ядре будут пропорциональны росту электромагнитной мощности в степени $3/4$.

Принимая эту цифру за верхний целесообразный предел, получаем $P_{if} \equiv f^{0,25} P_{i50}^{3/4}$, следовательно

$$P_{if} \equiv f, \quad (9)$$

т. е. мощность возрастает пропорционально частоте.

Масса синхронного генератора определяется как

$$m_{ГЕН} = m_{МА} + m_{МВ} + m_{МУ} + m_Z + m_{Ja} + m_{II} + m_{JM} + m_{II} + m_K, \quad (10)$$

где $m_{МА}, m_{МВ}, m_{МУ}, m_Z, m_{Ja}, m_{II}, m_{JM}, m_{II}, m_K$ - соответственно масса меди обмотки якоря, меди обмотки возбуждения, меди демпферной клетки, стали зубцов якоря, ярма якоря, ярма индуктора, изоляции якоря и конструкционных материалов, кг.

Результаты расчетов массы синхронного генератора системы автономного электропривода в зависимости от частоты напряжения приведены на рисунке 1.

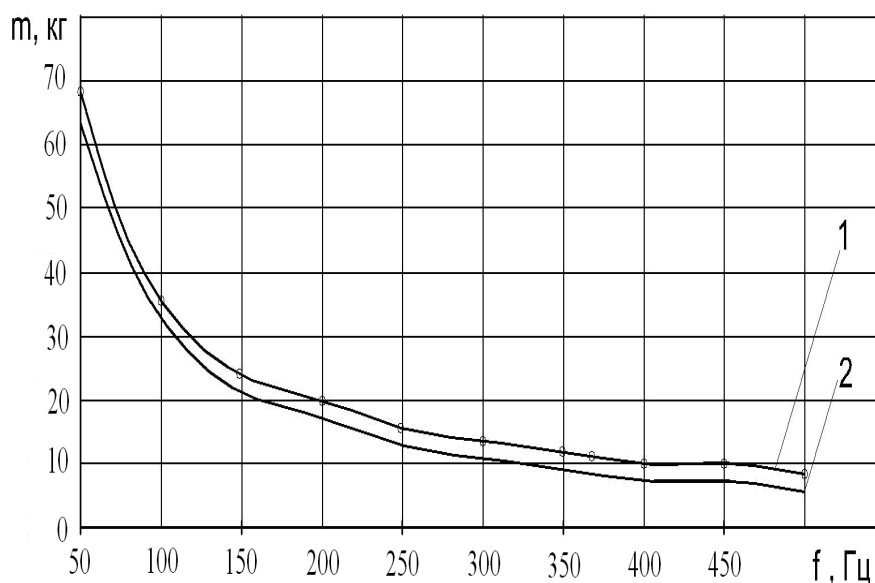


Рисунок 1 – Зависимость массы синхронного генератора от частоты напряжения при $U = 36$ В (кривая 1), 220В (кривая 2); $P = 6,0$ кВА

Также для технико-экономической оценки автономных систем важным показателем является стоимость синхронного генератора.

Для расчета стоимости системы автономного электропривода необходимо определить стоимости всех составляющих элементов системы.

Расчет стоимости электрических машин системы ведется следующим образом. В качестве стоимости используем себестоимость машины

$$C_{МАШ} = C_{МАТ} + C_{ПР}, \quad (11)$$

где $C_{МАТ}$ - общая стоимость материалов, примененных в машине, тг; $C_{ПР}$ - стоимость производства машины, тг.

Стоимость материалов может быть определена, исходя из заготовительной массы материалов и цены материалов по формулам приведенным в таблице 1 [1].

Таблица 1 - Формулы для расчета стоимости материалов

Наименование материала	Заготовительная масса, кг	Стоимость материала, тг
Провода обмоток	$m'_M = 1,03m_M$	$C_M = c_M \cdot m'_M$
Сталь сердечников статора и ротора	$m'_{C\Sigma} = 7,8l_{эф} \cdot (D_{H1} + \Delta_{um})^2 \cdot 10^{-6}$	$C_{C\Sigma} = c_C \cdot m'_{C\Sigma}$
Изоляция	$m'_H = 1,05m_H$	$C_H = c_H \cdot m'_H$
Конструкционные материалы	$m'_K = 1,1m_K$	$C_K = c_K \cdot m'_K$

Здесь m , m' - «чистая» и заготовительная массы рассматриваемого рода материала; $l_{эф}$ - эффективная длина сердечника статора, без учета изоляционного покрытия и

неполного прилегания листов, наличия радиальных вентиляционных каналов; $\Delta_{шт}$ - припуск на штамповку.

Значения «чистой» массы материалов определены в разделе 2.4. Заготовительная масса сердечников статора и ротора (остова и полюсов) синхронных машин вычисляется в соответствии с принятой конструкцией ротора и намеченным процессом штамповки листов статора [62].

Стоимость C_M проводов обмоток приведена в таблице 2.

Таблица 2 - Стоимость проводов обмоток

Марка и форма поперечного сечения провода	Стоимость C_M , тенге/кг
Круглая	
ПЭТВП	$231,5 + \frac{56,92}{d}$
ПЭТ-155	$269,4 + \frac{66,4}{d}$
ПЭТК	$313 + \frac{75,89}{d}$

Здесь d и S – диаметр (мм) и площадь поперечного сечения (мм²) провода без изоляции.

Стоимость листовой стали C_C приведена ниже в таблице 3.

Таблица 3 - Стоимость стали различных марок

Марка стали	2013	2312	2312	2411	3411	ст 30
Толщина	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	10 ⁻⁶
Значение C_C , тенге/кг	39,84	47,43	42,69	56,92	47,43	18,21

Суммарная стоимость материалов машин переменного тока

$$C_{MAT} = C_{M\Sigma} + C_{ал} + C_{C\Sigma} + C_H + C_K, \quad (12)$$

где $C_{M\Sigma}$ - суммарная стоимость обмоточных проводов, тг; $C_{C\Sigma}$ - суммарная стоимость листовой стали, тг.

Стоимость производства, а следовательно, и себестоимость машины на электромашиностроительном предприятии определяется путем подробной калькуляции с учетом масштаба выпуска, уровня технологического процесса, уровня механизации и автоматизации производства. Однако при разработке проекта и сравнения различных вариантов достаточно определить приближенное значение стоимости производства [3].

$$C_{PP} \approx k_{PP} \sqrt{h} \cdot D_{H1}^2 \cdot \left(0,4 + \frac{l}{D_{H1}} \right), \quad (13)$$

где k_{IP} - коэффициент, определяемый совершенством оборудования, технологического процесса и организации производства (среднее значение $k_{ID} = 6,5 \cdot 10^{-4}$ для синхронных машин).

Для определения стоимости редуктора, кабельной сети, аппаратуры защиты и управления определяем статистическим методом, согласно данным прейскурантов цен на эти изделия.

Пример расчета приведенной стоимости системы автономного электропривода в зависимости от частоты напряжения, при $P = 3,0$ кВт, приведена на рисунке 2.

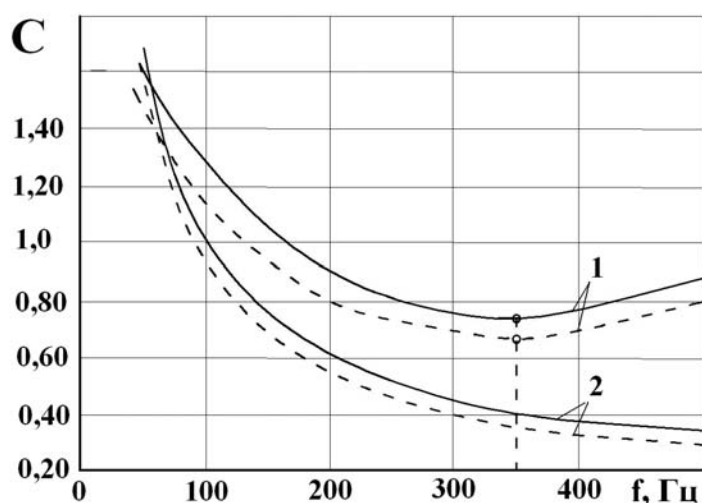


Рисунок 2 – Зависимость приведенной стоимости системы автономного асинхронного электропривода от частоты напряжения для безредукторного привода (кривые 1), редукторного привода (кривые 2)

Заключение

Проведенный анализ работ по оптимизации синхронных генераторов автономных энергетических систем и установок показал, среди синхронных генераторов автономных энергетических систем и установок наилучшими массогабаритными и эксплуатационными показателями обладают синхронные генераторы повышенной частоты напряжения. Также приведены методики расчетов масс и стоимости синхронного генератора автономных систем.

Литература

1. Брускин Д.Э. и др. Электрические машины и микромашины. -М.: Высш. школа, 1971. - 432с.
2. Справочник по электрическим машинам /Под ред. И.П. Копылов и Б.К. Клоков. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - Т. 1. - 456с.
3. Китаенко Г.И. Судовые электроэнергетические системы повышенных параметров. - Л.: Энергия, 1970. - 375с.

4. *Загорский А.Е.* Исследование и разработка электрических машин переменной частоты. - М.: Энергия, 1975. - 206с.

5. *Чалый Г.В.* Частота промышленного переменного тока и проблема ее оптимизации. - Кишинев: Штиинца, 1992. - 450с.

6. *Балагуров В.А.* Проектирование специальных электрических машин переменного тока. - М.: Высшая школа, 1982.- 272 с.

Шыныбай Ж.С., Есимханов С.Б., Карамурзин Р.М.

АВТОНОМДЫ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕР МЕН ҚОНДЫРҒЫЛАРДЫҢ СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРЛАР ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ ТУРАЛЫ

Аңдатпа

Мақалада жоғары жиілікті синхронды генераторлардың параметрлерін оңтайландыру туралы ақпарат келтірілген. Айналу жиілігі өскен кездегі жоғары жиілікті синхронды генераторлардың параметрлері мен техникалық көрсеткіштеріне әсер ететін заңдылықтар зерттелген. Синхронды генератордың құраушы бөліктердің массалары мен құндарын есептеу әдістемелері құрастырылды.

Кілт сөздер: автономды энергетикалық жүйесі, синхронды генератор, токтың жиілігі, электр машиналардың массасы, генератордың құны.

Shynybay Zh.S., Yessimkhanov S.B., Karamurzin R.M.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF SYNCHRONOUS GENERATORS OF AUTONOMOUS ENERGY SYSTEMS AND INSTALLATIONS

Abstract

The article provides information on optimizing the parameters of synchronous generators of increased frequency. Regularities are investigated which, with increasing frequency of rotation, affect the parameters and technical parameters of synchronous generators of increased frequency. The methods for calculating the masses and the values of the constituent elements of the synchronous generator have been compiled.

Keywords: an autonomous power system, a synchronous generator, the frequency of the current, the mass of electrical machines, the cost of the generator.