

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИСКРЕТНОСТИ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

И.С. Сидоров

*СамГТУ,
г. Самара, Россия
sidoov@rambler.ru*

Регулируемый электропривод широко используется в различных отраслях промышленности. Цифровые технологии, используемые в управлении электроприводом, передают команды на усилители мощности, питающие электродвигатели исполнительного органа, через экстраполятор нулевого порядка. Дискретность последнего вносит погрешность в управлении электроприводом. В статье рассматривается оценка погрешности от дискретности экстраполятора и даются рекомендации по формированию задания для улучшения динамических показателей качества.

Ключевые слова: *дискретность, экстраполятор нулевого порядка, регулируемый электропривод, передаточная функция.*

Регулируемый электропривод первоначально применялся только в машиностроении при инструментальной обработке материалов [1]. Однако его потенциал был очень быстро реализован в начале 70-х годов в результате расширения областей обработки, развития промышленных роботов, систем автоматизированной сборки и других отраслей промышленности.

Сегодня трудно найти сферу деятельности, где нет применения электроприводам. Наибольшее применение они находят в следующих областях:

- обработка материалов;
- подъемно-транспортное оборудование;
- деревообработка;
- нефте – газовая промышленность.

Регулируемые электроприводы широко используются в различных областях, и не все применения имеют высокую динамику. Однако возможности получения высокостабильного или точного управления, широкий диапазон регулирования скорости, высокая помехоустойчивость, малые габариты и вес часто являются решающим фактором их применения.

Сегодня современные цифровые технологии позволяют намного легче использовать электроприводы, чем несколько лет назад. Цифровые технологии предлагают широкий выбор ориентированных на специальное применение возможностей, большое разнообразие устройств связи с объектами и возможность использовать персональный компьютер для контроля, оптимизации и автоматической настройки привода.

Использование цифровых технологий в электроприводе вносит погрешность в управлении. Основным элементом, вносящим дискретность, является экстраполятор нулевого порядка [2].

Рассмотрим структурную схему электропривода, показанную на рисунке 1, построенную по принципу подчиненного регулирования и настроенную на реализацию технического оптимума с включением экстраполятора нулевого порядка [3].

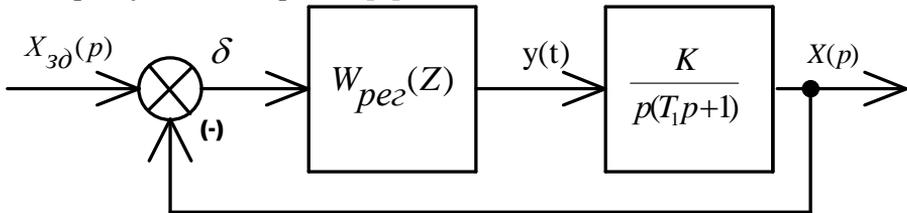


Рис. 1. Структурная схема электропривода

Экстраполятор нулевого порядка – электронный фильтр, преобразующий оцифрованный сигнал в непрерывный, он входит в структуру цифро – аналогового преобразователя (ЦАП) регулятора положения $W_{pez}(Z)$. ЦАП генерирует сигналы управления для аналоговой части электропривода $y(t)$ усилителя мощности. ЦАП включает в себя экстраполятор нулевого порядка, который удерживает полученный сигнал на протяжении всего периода T . Эта величина определяет дискретность системы. Максимальная частота дискретизации — максимальная частота, на которой ЦАП может работать, выдавая на выходе корректный результат.

Для анализа влияния дискретности на динамические показатели качества примем передаточную функцию, соответствующей системе автоматического управления электроприводом, которая имеет вид:

$$W_p(p) = \frac{6,25}{p(0,08p + 1)}.$$

Значения периода дискретности экстраполятора выбирались в диапазоне: $T=0,04с$; $0,08с$; $0,16с$; $0,4с$. [4]. Дискретность, вносимую экстраполятором будем оценивать относительно непрерывной САУ электроприводом, которая служит эталоном.

С помощью среды моделирования «MATLABSimulink» построим графики переходных процессов и оценим влияние периода дискретности на показатели качества управления [5]. Структурная схема исследуемой системы в среде моделирования «MATLABSimulink» имеет вид, представленный на рисунке 2.

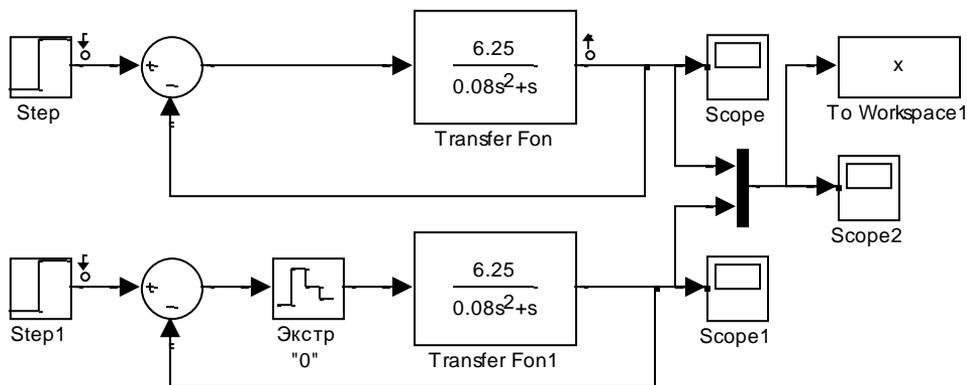


Рис. 2. Модель исследуемой САУ в среде моделирования «MATLAB Simulink»

На рисунке представлены дискретная и аналоговая САУ, как эталон. Изменяя значения периода дискретности T экстраполятора нулевого порядка в пределах выбранных в исследовании значений, получим графики переходных процессов, показанных на рисунке 3.

Анализ графиков переходного процесса показывает, что система существенно снижает запасы устойчивости, а, следовательно, существенно изменяет динамические показатели качества управления: $\sigma\%$, t_p – перерегулирование и время переходного процесса соответственно, при увеличении периода дискретности экстраполятора T [6]. При значении $T = 0,4$ с система теряет устойчивость, а при $T = 0,04$ с приближается к характеристикам аналогового прототипа.

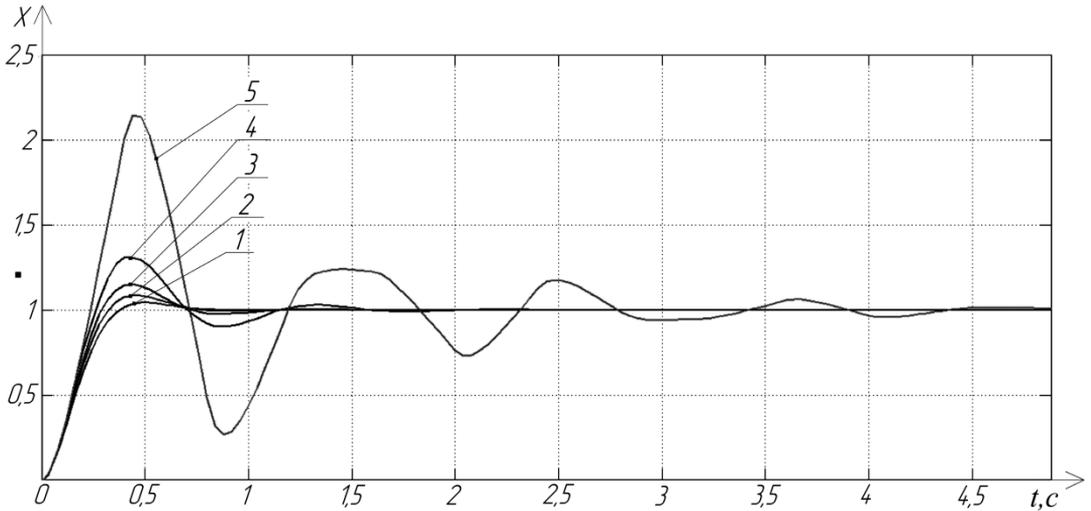


Рис. 3. Графики переходных процессов в системе с экстраполятором нулевого порядка:

1 – $T=0с.$, $\sigma = 4,3\%$, $t_p = 0,3с.$; 2 – $T=0,04с.$, $\sigma = 8,6\%$, $t_p = 0,5с.$; 3 – $T=0,08с.$, $\sigma = 12\%$, $t_p = 0,7с.$; 4 – $T=0,16с.$, $\sigma = 30\%$, $t_p = 1,1с.$; 5 – $T=0,4с.$, $\sigma = 114\%$, $t_p = 3,7с.$

На основании проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы, что для достижения необходимых показателей качества управления необходимо уменьшать частоту квантования T экстраполятора нулевого порядка.

Библиографический список:

1. В.И. Ключев. «Теория электропривода». М.: Энергоиздат, 2001.
2. В.Е. Лысов. «Теория автоматического управления». М.: Машиностроение. 2010.–500с.
3. Э.Я. Рапопорт. «Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока». Конспект лекций. Куйбышев 1985. –56с.
4. В.Е. Лысов, И.С. Сидоров. «Анализ устойчивости позиционно – следящего электропривода с учетом дискретности экстраполятора нулевого порядка». Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки» №3(47). 2015. С. 142 – 148.

5. В.П. Дьяконов. «MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании». Серия «Библиотека профессионала». М.: Солон – Пресс, 2005.

6. В.А. Бесекерский. «Цифровые автоматические системы». М.: Наука, 1976.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НПС С ПРИМЕНЕНИЕМ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

М.В.Пименова

СамГТУ

Самара, Россия

mariya.pimenova2018@yandex.ru

Одним из результатов реализации Долгосрочной программы ОАО «АК «Транснефть» на период до 2020 года является снижение удельного потребления электроэнергии на транспорт нефти на 3,8%.

Рассмотрим возможность снижения удельного потребления электроэнергии на транспорт нефти за счет уменьшения гидравлических потерь напора на НПС.

Для анализа величин потерь напора на НПС возьмем технические показатели 4-х НПС технологического участка МН при производительности перекачки $Q = 12364 \text{ м}^3/\text{ч}$ и плотности нефти 860 кг/м^3 .

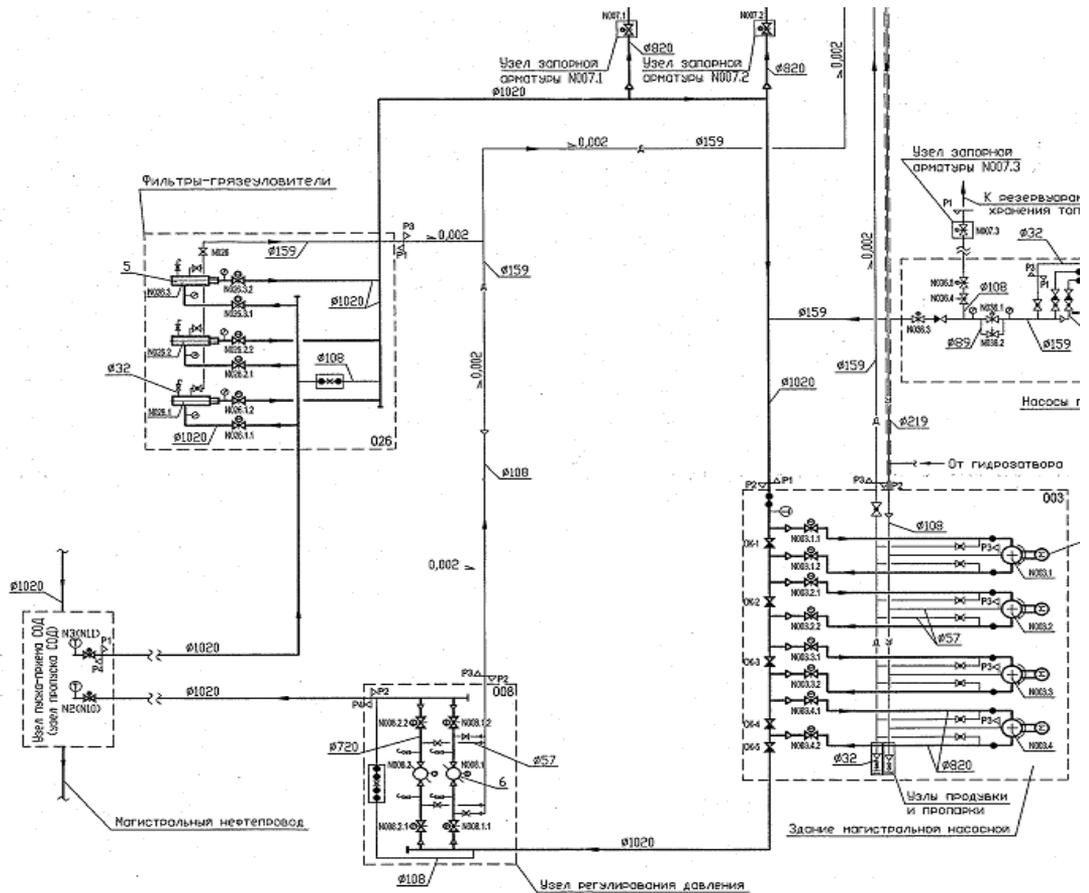


Рис. 1. Технологическая схема НПС

Таблица 1.
Технические показатели НПС, кг/см²

Давления на НПС, кг/см ²	А	Б	В	Г
На входе НПС	15,9	10,7	10,8	9,9
Перепад на ФГУ	0,8	0,75	0,74	0,64
На входе МНС	14,9	8,7	9,9	8,9
На входе работающего МНА №1	14,7	8,4	9,7	8,5
На выходе работающего МНА №1	30,1	24,8	24,5	26,3
На входе работающего МНА №2	29,7	24,7	24,2	26,1
На выходе работающего МНА №2	44,6	41,8	39,5	41,6
На входе работающего МНА №3	44,1	-	-	-
На выходе работающего МНА №3	52,5	-	-	-
Перед РД	52,1	41,4	39,2	41,4
Открытие РД, %	100	100	100	100
После РД	51,5	40,8	38,6	40,8
На выходе НПС	50,9	40,6	38,2	40,5

Пересчитав давления в напоры, получим следующее:

Таблица 2.

Технические показатели НПС, м

Напоры на НПС, м	А	Б	В	Г
На входе НПС	184,9	124,4	125,6	115,1
Перепад на ФГУ	9,3	8,7	8,6	7,4
На входе МНС	173,3	101,2	115,1	103,5
На входе работающего МНА №1	170,9	97,7	112,8	98,8
На выходе работающего МНА №1	350,0	288,4	284,9	305,8
На входе работающего МНА №2	345,4	287,2	281,4	303,5
На выходе работающего МНА №2	518,6	486,0	459,3	483,7
На входе работающего МНА №3	512,8	-	-	-
На выходе работающего МНА №3	610,5	-	-	-
Перед РД	605,8	481,4	455,8	481,4
После РД	598,8	474,4	448,8	474,4
На выходе НПС	591,9	472,1	444,2	470,9

По таблице 2 можно рассчитать напор каждого МНА и суммарный напор работающих МНА каждой НПС

Таблица 3.
Напор НПС

Напоры на НПС, м	А	Б	В	Г
Напор МНА №1	179,1	190,7	172,1	207,0
Напор МНА №2	173,3	198,8	177,9	180,2
Напор МНА №3	97,6	-	-	-
Суммарный напор МНА	450,0	389,5	350,0	387,2

Введем понятие гидравлический КПД НПС ($\eta_{гНПС}$) как отношение полезного напора, создаваемого НПС, к суммарному напору работающих МНА

$$\eta_{гНПС} = \frac{(H_{выхНПС} - H_{вхНПС})}{H_{сумМНА}},$$

где $H_{вх НПС}$ – напор на входе НПС

$H_{вых НПС}$ – напор на выходе НПС

$H_{\text{сум МНА}}$ - суммарный напор работающих МНА

Рассчитаем гидравлический КПД каждой НПС

1) НПС «А»

$$\eta_{\text{НПС}} = (591,9 - 184,9) / 450,0 = 0,904 \text{ или } 90,4\%$$

2) НПС «Б»

$$\eta_{\text{НПС}} = (472,1 - 124,4) / 389,5 = 0,893 \text{ или } 89,3\%$$

3) НПС «В»

$$\eta_{\text{НПС}} = (444,2 - 125,6) / 350,0 = 0,910 \text{ или } 91,0\%$$

4) НПС «Г»

$$\eta_{\text{НПС}} = (470,4 - 115,1) / 387,2 = 0,918 \text{ или } 91,8\%$$

Таким образом гидравлические потери на НПС снижают КПД МНА на величину от 8,2% до 10,7%.

Рассмотрим состав и значимость гидравлических потерь напора на НПС

Таблица 4.
Гидравлические потери на НПС

Потери напора на НПС	А		Б		В		Г	
	м	%	м	%	м	%	м	%
От входа НПС до входе МНС, в том числе перепад на ФГУ	11,6	27,0	23,2	55,5	10,5	33,4	11,6	36,9
	9,3	21,7	8,7	19,4	8,6	27,4	7,4	23,6
В коллекторе (от входа в МНС до РД)	17,4	40,6	9,3	22,2	9,3	29,6	9,3	29,6
Перепад на РД	7,0	16,3	7,0	16,7	7,0	22,3	7,0	22,3
От РД до выхода НПС	6,9	16,1	2,3	5,6	4,6	14,6	3,5	11,2
Всего	42,9	100	41,8	100	31,4	100	31,4	100

Исходя из полученных результатов можно предложить ряд мероприятий для уменьшения гидравлических потерь напора на НПС:

1. Уменьшение скорости потока за счет увеличения диаметров основных технологических трубопроводов.
2. Увеличение количества работающих ФГУ или изменение их конструкции.
3. Изменение монтажных схем обвязки оборудования НПС с уменьшением количества соединительных деталей.
4. Периодическая очистка основных технологических трубопроводов.
5. Применение специальных присадок.

УДК 621.313

АНАЛИЗ СИСТЕМ ЗАПУСКА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

А.С. Ануфриев, М.Н. Алимбеков, Ю.А. Макаричев

*Самарский государственный технический университет
г. Самара, Россия
makarichev2801@mail.ru*

Государственная политика в области экологии направлена на ужесточение норм на выбросы загрязняющих веществ, поэтому турбодетандерный запуск газотурбинного оборудования заменяется экологически чистым электрозапуском. Кроме того, электрозапуск обеспечивает требования сбережения энергоресурсов (природного газа) и уменьшения взрывоопасности. Он также уменьшает время обслуживания, увеличивает ресурс и срок службы систем запуска.

В качестве приводного электродвигателя в системах стартерного пуска газотурбинных двигателей (ГТД) используются либо асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, либо синхронные двигатели с постоянными магнитами. Для уменьшения габаритов и массы двигателя изготавливаются на повышенную частоту вращения – обычно 9 – 12 тыс. оборотов в минуту. При этом используется понижающий редуктор с коэффициентом редукции 2-2,5. И те, и другие двигатели имеют свои достоинства и недостатки. К достоинствам асинхронных двигателей следует отнести простоту и надежность, меньшую стоимость, а синхронные машины с постоянными магнитами отличаются повышенными

энергетическими показателями, большим моментом в заданных габаритах, большей перегрузочной способностью.

Питание электродвигателей осуществляется от частотного преобразователя, обладающего возможностью регулирования частоты практически от нуля до номинального значения. При этом, как правило, применяется закон пропорционального регулирования частоты и амплитуды питающего напряжения.

Для частотного преобразователя асинхронного двигателя дополнительно требуется обеспечение реактивной мощности для питания обмотки статора. Это несколько усложняет схему преобразователя.

Электродвигатели для стартерного пуска имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании. В первую очередь, это учет повышенной частоты питающего напряжения, во-вторых, кратковременный режим работы, в-третьих, интенсивные токовые и динамические нагрузки.

На рубеже 1990-х – 2000-х годов обозначился ряд проблем, связанных с запуском ГТД, предназначенных для работы в составе газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и газотурбинных электростанций. Широко применяемый на ГПА запуск с помощью турбодетандеров при всей своей простоте обладает существенными недостатками. Во-первых, необеспеченность требований по экологической безопасности, которую необходимо соблюдать в связи с участием России в выполнении условий Киотского протокола. Кроме того, при установке ГПА и ГТЭС вблизи населенных пунктов становится актуальным обеспечение большей взрывобезопасности при выбросе природного газа в атмосферу в процессе запуска от турбодетандера. И, наконец, необратимые потери в больших объемах ценного природного газа. По некоторым оценкам на осуществление турбодетандерного запуска двигателя суммарно в год выбрасывается до 3 млн. м³ природного газа [1].

В связи с ужесточением требований отечественных энергетических и газодобывающих компаний к экологической безопасности эксплуатируемых и поступающих в эксплуатацию газотурбинных газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и электростанций (ГТЭС) все более актуальной становится замена применяемого турбодетандерного запуска газотурбинных двигателей (ГТД) на электрозапуск.

При турбодетандерном запуске используется несжигаемый природный газ, который в процессе запуска тысячами кубометров выбрасывается в атмосферу. Электрический же запуск является экологически чистым, так как использование газа при запуске исключается. Кроме того, из-за отсутствия подвода газа к электростартеру обеспечивается существенное преимущество электрозапуска – выполнение

требований по его взрывобезопасности.

Принцип действия систем электрозапуска основан на преобразовании электрической энергии в механическую с помощью электродвигателя с частотно-токовым управлением. В каждый момент времени преобразователь частоты выдает на электродвигатель напряжение такого уровня и частоты, которое обеспечивает рабочий ток и развиваемый двигателем момент, соответствующие сигналу устройства задания момента.

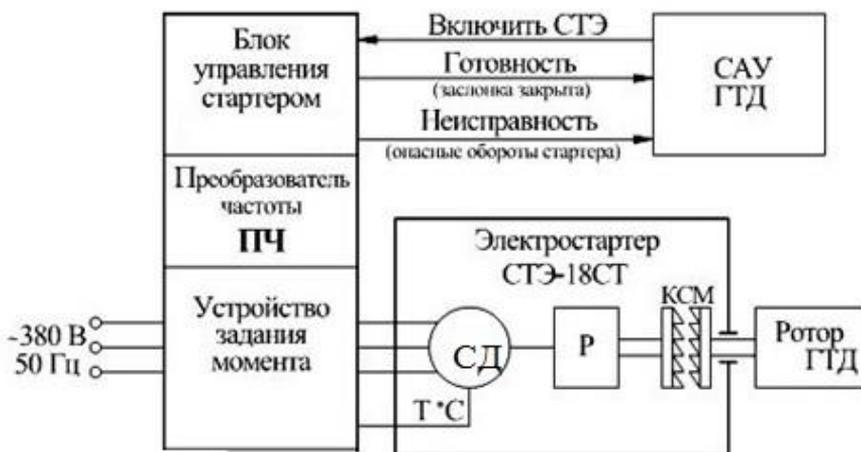


Рис.1 Структурная схема электрозапуска ГТД

Системы электрозапуска имеют следующие особенности:

- электродвигатель электростартера выполнен на повышенную частоту вращения 11500 об/мин, что позволило увеличить энергоотдачу в 10 и более раз по сравнению с электродвигателями с промышленной частотой вращения;
- устройство задания момента обеспечивает плавное увеличение крутящего момента и безударное зацепление кулачковой муфты при включении электростартера, а в конце раскрутки ротора ГТД для исключения перегрузки трансмиссии снижает крутящий момент пропорционально частоте вращения;
- системы электрозапуска имеют встроенные средства защиты по току, напряжению и от перегревов блока управления и электростартера [2,3].

Расчеты и моделирование различных типов электродвигателей показали, что синхронные двигатели с возбуждением от постоянных

магнитов имеют лучшие технические характеристики по сравнению с асинхронными: более высокий КПД, большую перегрузочную способность, лучшие пусковые характеристики при частотном пуске. Синхронные двигатели для рассматриваемых систем имеют меньшие массу и габариты. У них меньше перегрев обмотки статора [4].

Сравнение экономических характеристик турбодетандерного и электрозапуска показало существенные преимущества электромеханической системы. Так, для одного электрозапуска ГПА с помощью системы электрозапуска, состоящей из электростартера и блока управления, требуется 3 кВт•час электроэнергии, стоимость которой составляет около 6 рублей, а для турбодетандерного запуска используется примерно 1000 кубометров газа, стоимость которого составит около 3000 рублей (по бытовым ценам).

Библиографический список:

1. *Каравеев В.И., Греков К.Ю., Обухов С.Б.* Экологически чистая система электрозапуска газотурбинных двигателей//Рынок Электротехники, № 3, 2007 – www.marketelectro.ru/magazine/readem0307/26.
2. *Данилович А.С.* Электрозапуск – повышение конкурентоспособности // Пермские газовые турбины, ИБ № 8, 2006 – www.avid.ru/pr/other/ntex/ib8/elektrozapusk
3. *Шалагинов В.Ф., Миронов В.А., Обухов С.Б., Туев Ю.Р.* Системы электрозапуска газотурбинных двигателей ГПА и ГТЭС //Газотурбинные технологии – 2009, № 8. – С.32-33.
4. *Макаричев Ю.А.* Расчет высокоскоростных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. 2015 – СамГТУ, Учебное пособие.–75с.

УДК 621.313.08

**БЕСЩЕТОЧНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ИНТЕГРИРОВАННЫМ
ГИБРИДНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ***Ю.В.Зубков, А.И. Давидков**СамГТУ
Самара, Россия
zubkov1412@mail.ru*

Генераторы с бесщеточным возбуждением, широко применяемые в таких областях, как транспорт, авиация, геологоразведка характеризуются рядом особенностей: высокая надежность, простота обслуживания и т.д. [1]. Бесщеточное возбуждение синхронных машин реализуется различными методами, такими как каскадное соединение двух машин на общем валу, генераторы с когтеобразными полюсами, индукторные генераторы, генераторы с магнитоэлектрическим возбуждением [2]. Теория большинства перечисленных машин находится в настоящее время в стадии исследования. Традиционные синхронные радиально-возбуждаемые генераторы с контактно-щеточным аппаратом достаточно изучены, обладают хорошими весо-габаритными показателями по причине отсутствия дополнительных зазоров и аксиального магнитного потока, однако наличие щеток и контактных колец для возбуждения магнитного поля вызывает искрение и проблемы в обслуживании.

При использовании отдельного возбудителя для бесщеточного возбуждения его обмотка якоря располагается на роторе и подключается к обмотке возбуждения основного генератора через вращающийся выпрямитель. Применение дополнительного возбудителя увеличивает объем активной части и стоимость машины.

Также для создания магнитного поля применяется магнитоэлектрическое возбуждение [3], однако при этом отсутствует возможность регулирования выходного напряжения. В [4] предложена электрическая схема, в которой на статоре располагаются обмотки возбуждения возбудителя и якоря основного генератора, а на роторе – одна многофазная обмотка, замкнутая на себя через однополупериодный выпрямитель. Такая обмотка выполняет одновременно функции якорной обмотки возбудителя и обмотки возбуждения основного генератора. Такое решение бесщеточного возбуждения весьма просто, но ведет к ухудшению использования объема машины.

С целью обеспечения надежного самовозбуждения в [5] предложена конструкция генератора, где ротор имеет два источника намагничивания:

- обмотка возбуждения, питаемая постоянным током от интегрированного возбудителя;
- постоянные магниты *PM*.

Оба источника действуют параллельно согласно по отношению к магнитной цепи генератора. Возбудитель является синхронной неявнополюсной машиной, якорная обмотка которой уложена в пазы на поверхности полюсных наконечников, выполненных из магнитомягкой стали. Обмотка возбуждения находится в тех же пазах статора, что и обмотка якоря основного генератора. Такое решение позволяет эффективно регулировать выходное напряжение, но значительно усложняет конструкцию.

Из приведенных выше рассуждений следует, что существующие технологии бесщеточного возбуждения имеют недостатки:

- наличие осевого магнитного поля и большой массы ротора и подшипниковых щитов;
- дополнительный возбудитель увеличивает объем системы генерирования;
- увеличенные потери на возбуждение и отсутствие возможности регулирования выходного напряжения;
- сложность конструкции, что не всегда оправдано для генераторов небольшой мощности.

В данной работе предлагается новая конструкция бесщеточного генератора с гибридным возбуждением (IBESG), в которой возбудитель интегрирован в основной генератор (совмещен магнитно и электрически) рис.1. При этом обеспечиваются хорошие весо-габаритные показатели и регулировочные свойства. В IBESG реализуется бесщеточное возбуждение при сохранении достоинств классического щеточного возбуждения синхронного генератора (SG).

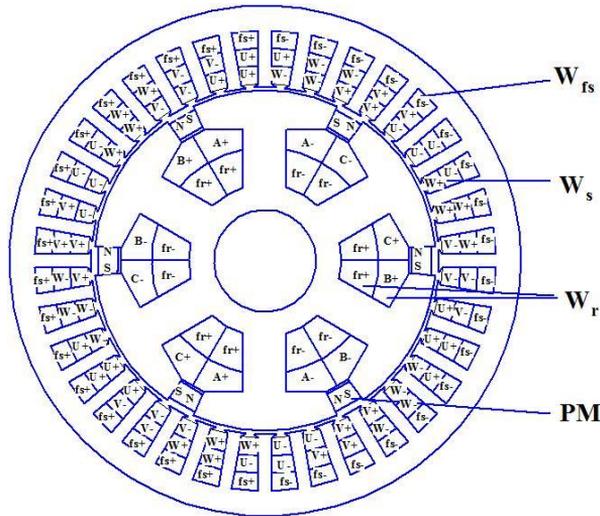


Рис.1. Конструкция генератора с гибридным интегрированным возбуждением

Структура и принцип действия IBESG

IBESG состоит из двух частей: возбудителя и основного генератора. Обе части расположены в общем магнитопроводе. Обмотки возбуждения возбудителя W_{fs} и якоря основного генератора W_s располагаются в пазах статора. На явнополюсном роторе находится одна обмотка, выполняющая функции обмотки якоря возбудителя W_r и возбуждения генератора W_{fr} , замкнутая на себя через однополупериодный вращающийся выпрямитель. Расположение обмоток и намагниченность постоянных магнитов показаны на рис. 1. Якорная обмотка статора выполнена двухслойной с укорочением на $1/6$ полюсного деления. Обмотка ротора зубцовая, с укорочением в магнитном двухполюсном поле возбудителя на $1/3$ с целью исключения индуктивной связи с шестиполюсным магнитным полем основного генератора.

Благодаря наличию постоянных магнитов IBESG может генерировать электроэнергию при отсутствии тока возбуждения. Ток возбуждения статора I_{fs} для питания обмотки W_s обеспечивается с выхода основного генератора. Таким образом, реализуется устойчивое самовозбуждение.

Числа пар полюсов основного генератора и возбудителя связаны соотношением $\frac{p_2}{p_1} = m_r$, где m_r - число фаз обмотки ротора. Схемы обмоток

составлены таким образом, что шестипольное магнитное поле основного генератора не может индуцировать ЭДС в обмотках возбудителя и наоборот.

При отсутствии тока в обмотке возбуждения возбудителя магнитный поток PM (ψ_{PM}) замыкается в сердечнике ротора, как показано на рис.2а. Поток рассеяния PM замыкается через воздушный зазор и индуцирует в обмотке статора W_s ЭДС, обеспечивающую протекание тока I_{fs} в обмотке возбуждения возбудителя W_{fs} .

Когда в обмотке W_{fs} протекает ток I_{fs} , в воздушном зазоре возникает неподвижное магнитное поле и индуцирует напряжение и ток I_r в обмотке ротора W_r . На рис.2б показан поток, создаваемый током возбуждения возбудителя I_{fs} (ψ_{wf}). По обмоткам ротора протекает выпрямленный ток, переменная составляющая которого создает магнитный поток реакции якоря возбудителя. Постоянная составляющая I_{fr} образует магнитный поток возбуждения основного генератора (ψ_{wF}) рис.2.б. Принцип действия основного генератора идентичен работе классического синхронного генератора со щетками в цепи возбуждения.

Магнитный поток PM ψ_{PM} образует потокосцепление с обмоткой статора через воздушный зазор. Поток ψ_{PM} и поток, создаваемый током I_{fr} (ψ_{wF}), суммируются в зазоре, образуя результирующее магнитное поле. Поток в воздушном зазоре зависит от ψ_{wF} , поэтому индукцию в зазоре и величину выходного напряжения удобно регулировать с помощью изменения тока возбуждения возбудителя I_{fs} .

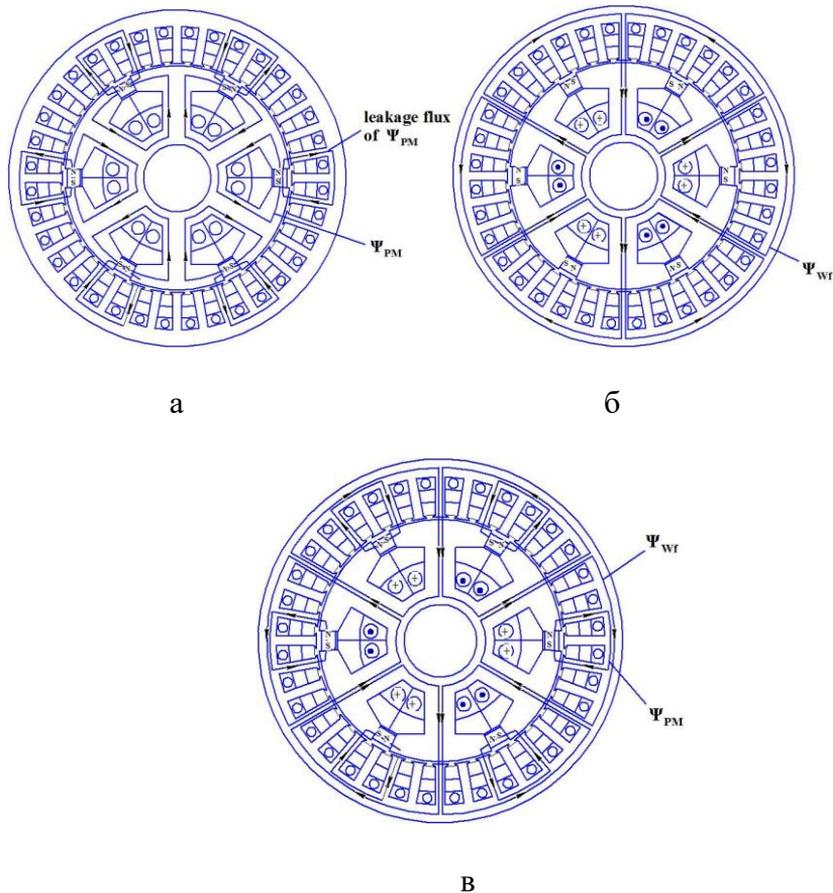


Рис.2. Магнитные потоки в IBESG

Библиографический список:

1. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины.- М.:Высш.шк., 1990.- 416 с.
2. Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей.- М.:Горячая линия-Телеком, 2006.-440 с.
3. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами.- М.: Энергоатомиздат, 1985.-168 с.
4. Зубков Ю.В., Овсянников В.Н. Выбор рациональной геометрии бесконтактного генератора совмещенного типа / Вестник транспорта поволжья. №6(42) 2013. с. 26-30.
5. Shushu Z., Chuang L., et al.: Theoretical and experimental analyses of a hybrid excitation

synchronous generator with integrated brushless excitation. IET Electr. Power Appl., 10(4), pp. 258-267.

УДК 621.313

ВЫБОР МАГНИТОВ МОМЕНТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В.Н. Овсянников, А.А. Индейкин

***Самарский государственный технический университет
г. Самара, Россия
ovsyannikov0512@mail.ru***

Специфика номинального режима работы моментного двигателя заключается в том, что его ротор заторможен моментом нагрузки, либо поворачивается на некоторый угол, заданный системой управления. В обоих случаях можно пренебречь величиной ЭДС вращения. При этом на статорную обмотку подается управляющий сигнал от источника постоянного напряжения или тока. Таким образом, расчет и анализ процессов, происходящих в машине, может быть осуществлен с помощью численного моделирования методом конечных элементов решением магнитостатической задачи в двумерной постановке. Для решения задачи были приняты следующие допущения [1,2]:

- источники магнитного поля стационарны (магнитодвижущие силы постоянных магнитов неизменны, токи обмотки статора постоянны);
- материал магнитопроводов изотропный, нелинейный по магнитным свойствам;
- ротор неподвижен;
- намагниченность магнитопроводов (кроме постоянных магнитов) при нулевых токах отсутствует;
- задача двумерная, плоскопараллельная (геометрия расчетных областей, свойства средств и параметры, характеризующие источники поля неизменны в направлении оси z);

Удобным инструментом для решения электромагнитных задач в двумерной и трехмерной постановке является специализированное программное обеспечение *Ansys Maxwell*. Кроме задач магнитостатики и электростатики софт позволяет решать задачи переходных процессов с

использованием внешних электрических цепей для возбуждения электромагнитного поля. Кроме того, программа позволяет использование переменных, функций и простейших логических операций в строках задания свойств блоков и источников поля.

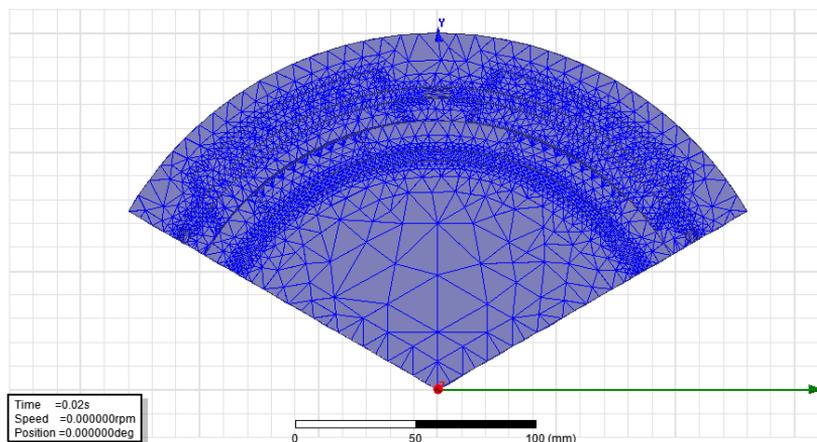


Рис.1. Сетка конечных элементов в программной среде *Ansys Maxwell*

Для решения электромагнитной задачи также необходимо задать физические свойства блоков геометрии. В качестве материала магнитопроводов статора и ротора используется сталь 2013, для неё была указана кривая намагничивания, позволяющая учесть нелинейные эффекты и зависимость потерь в стали от индукции для частоты 50 Гц, необходимая для решения задач на переходные процессы.

В качестве материала обмотки из стандартной библиотеки *Ansys Maxwell* задана медь, а свойствах обмотки оказано полное число ампервитков. При решении задачи для уменьшения конечных элементов геометрическая модель представлена одной парой полюсов, а на границах модели определена симметрия, при этом предполагается, что остальные полюса машины абсолютно идентичны в геометрическом и физическом плане [3]. Также в качестве граничного условия используется зануление внешнего магнитного потенциала.

Решим задачу с использованием в качестве магнитов сплавов *G26M*, *N38H*, *N3H*

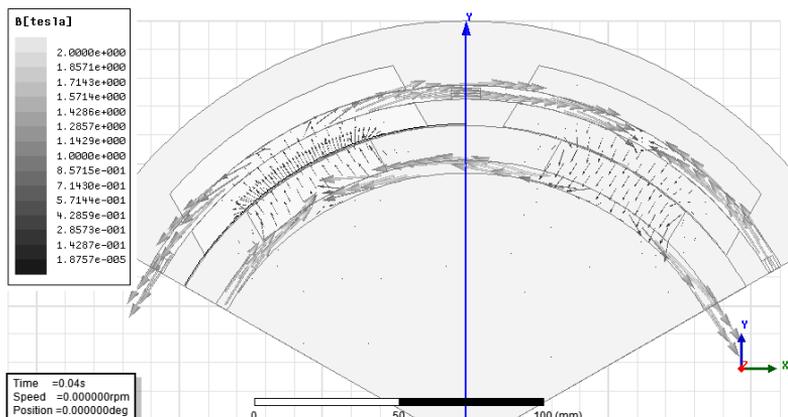


Рис.2. Основной магнитный поток МД на холостом ходу

Направления намагниченности полюсов выбраны таким образом, чтобы они чередовались. На рис.2 представлено решение задачи в отсутствии тока в катушках статора – холостой ход моментного двигателя, стрелками обозначается направление и величина магнитной индукции. Как видно из рис.2 максимальная индукция соответствует стальным участкам статора и ротора и достигает величины 2 Тл.

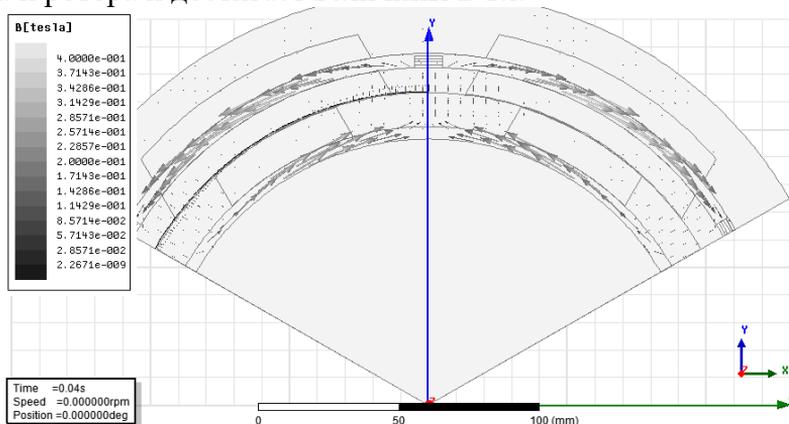


Рис.3. электромагнитное поле реакции якоря МД

Наибольшей величины магнитный поток достигает на стальных участках между полюсами, а минимальной – под полюсами, так как здесь происходит разветвления потока на два направления. Найдем величину реакции якоря, для этого нужно запитать катушки номинальным током, а постоянные магниты извлечь из расчета, решение задачи представлено на рис.2.

Из рис.3 видно, что поток реакции якоря замыкается по воздушным промежуткам между полюсами, при этом максимальное значение индукции

составляет порядка 0,4 Тл. Сравнивая между собой рис.2 и 3 отметим различные места насыщения стальных участков магнитопроводов.

Решим электромагнитную задачу по определению холостого хода МД, варьируя марку используемых магнитов, для определения величины индукции в зазоре. Величина зазора по всей длине полюса одинаковая и равная $\delta = 0,5$ мм. Геометрические размеры магнита постоянны и не зависят от марки сплава.

Результаты решения представлены на рис.4. Как и следовало ожидать, при использовании магнитов с большей остаточной индукцией увеличивается магнитная индукция в зазоре.

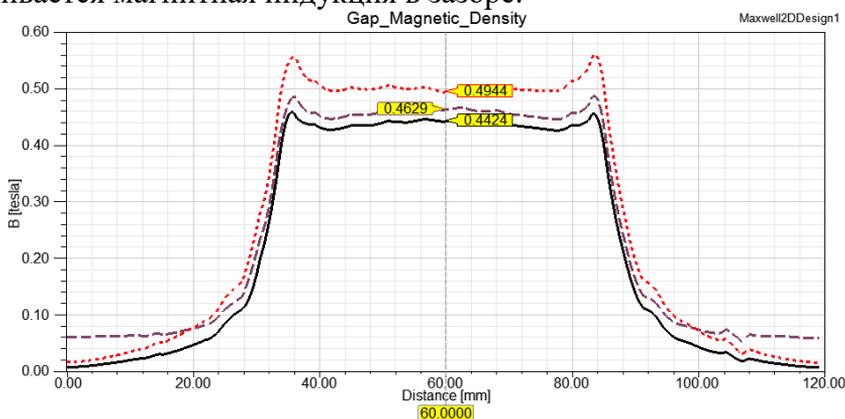


Рис.4. Магнитная индукция под полюсом на холостом ходу. G26M – сплошная линия, N38H – прерывистая линия с длинными штрихами, N3H – прерывистая линия с короткими штрихами

Как видно из рис.4 индукция в зазоре при использовании магнитного сплава G26M составила $B_{G26M} = 0,442$ Тл, $B_{N38H} = 0,463$ Тл, $B_{N3H} = 0,494$ Тл. Таким образом, использование магнита N3H вместо G26M позволяет увеличить индукцию в зазоре на 11,8%.

Библиографический список:

1. Овсянников В.Н. Особенности проектирования моментных двигателей систем энергосбережения трубопроводного транспорта / В.Н. Овсянников, Ю.А. Макаричев, В.М. Анисимов // ИВУЗ «Электромеханика». – 2011. - №3. - С. 54-56.
2. Овсянников В.Н. Расчет и анализ магнитного поля моментных двигателей с ограниченным углом поворота ротора / В.Н. Овсянников // Изв. Вузов «Электромеханика». – 2014. - № 5. - С. 35-39.
3. Овсянников В.Н. Выбор типа возбуждения моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора / В.Н. Овсянников // Труды

Всероссийской научно-технической конференции "Энергетика: состояние, проблемы, перспективы". - Оренбург, 2012. с.254 – 258.

УДК 621.365.51

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ КОЛЬЦА

А.Н.Проценко, К.Ю.Яшин

*Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
kossyash@yandex.ru*

Цель работы - исследование процесса нагрева металлической заготовки, использование различных методик для расчета и качественного сравнения устройств индукционного нагрева, различного конструктивного исполнения.

В качестве объекта исследования рассматривается стальное подшипниковое кольцо, которое необходимо нагреть до температуры, при которой возможна пластическая деформация детали.

Для решения данной задачи используется индукционный нагрев, так как он имеет ряд преимуществ: высокая концентрация энергии в нагреваемом объекте, бесконтактный нагрев, удобство регулирования и автоматизации, высокая точность технологического процесса, экологичность и отсутствие выброса вредных веществ в окружающую среду.

Исследовались установки индукционного нагрева двух типов: с С-образным сердечником для нагрева в поперечном электромагнитном поле, удобство которого заключается в одновременном нагреве и раскатке детали, и соленоидального исполнения с нагревом в продольном электромагнитном поле.

Для исследования процесса нагрева в поперечном электромагнитном поле использован программный пакет Flux3D. Она позволяет моделировать и рассчитывать пространственные поля различной физической природы, а также решать задачи, связанные с трехмерными объектами с меняющимися параметрами, которые обусловлены переходными процессами, протекающими при нагреве.

Для проведения серии расчетов при использовании соленоидального индуктора и нагреве в продольном электромагнитном поле использована программа Elcut, одним из достоинств которой является простота моделирования исследуемых процессов.

Оба программных продукта основаны на использовании метода конечных элементов. Данный метод позволяет работать с объектами сложной формы, неоднородными материалами, рассчитывать распределение полей различной физической природы в пространстве.

Для расчета устройств индукционного нагрева ферромагнитной стали использовались методики Кувалдина [1], Слухоцкого[2].

Методика [1] основана на связи различных энергетических параметров, полученной экспериментальным путём. Такой подход позволяет определить активные и реактивные мощности на участках системы. Методика [2] основана на использовании электрических и магнитных схем замещения системы индуктор-загрузка, а расчет энергетических величин возможен на основе единого подхода: сначала производится расчет напряженности магнитного поля на поверхности загрузки, а затем определение коэффициента связи, с последующим расчетом напряженности на поверхности индуктора и расчета мощностей.

Анализ и сравнение результатов вычислительных экспериментов показал следующее. При использовании индуктора с С-образным сердечником (Рис.1) нагрев по поверхности детали происходит довольно равномерно, но температура по окончании времени нагрева достигает значения 200°C, что не удовлетворяет условию задачи, так как для последующей деформации деталь необходимо нагреть до температуры 1100 °С. (Рис.2).

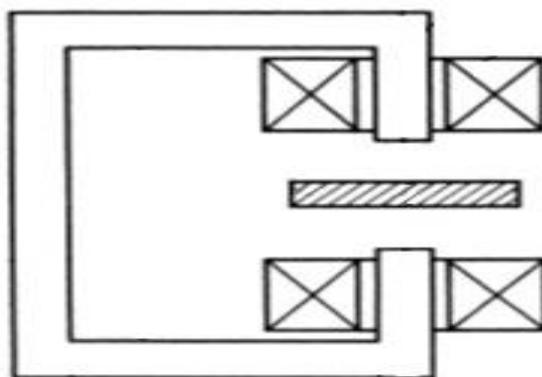


Рис.1 Эскиз индуктора с С-образным сердечником

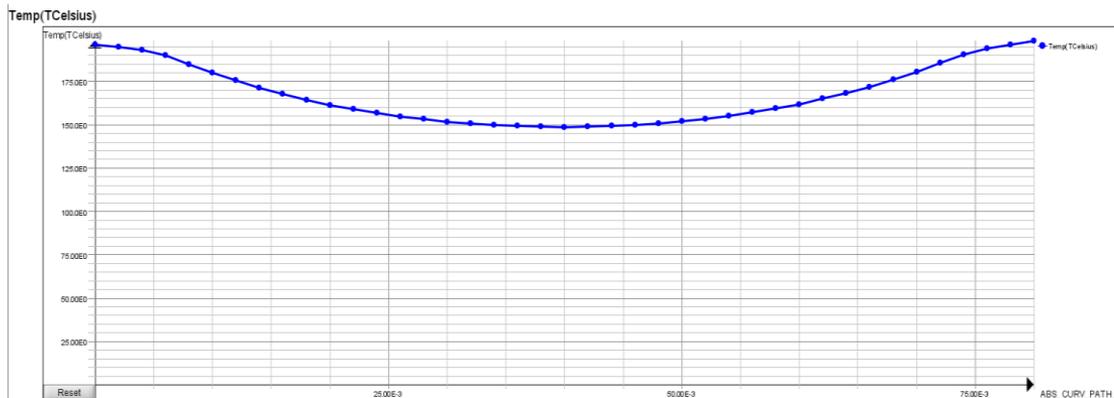


Рис.2 График температуры на боковой поверхности кольца

Таким образом, нагрев стальной заготовки под деформацию в поперечном магнитном поле невозможен при данной конфигурации конструкции. Решением проблемы может стать увеличение количества нагревающих индукторов, для повышения энергии, передаваемой детали.

Использование соленоидального индуктора (Рис.3) с полной загрузкой позволяет достигнуть требуемых значений температуры по окончании процесса нагрева и равна 1057°C , а отклонение от желаемой температуры менее 5%. (Рис.4).

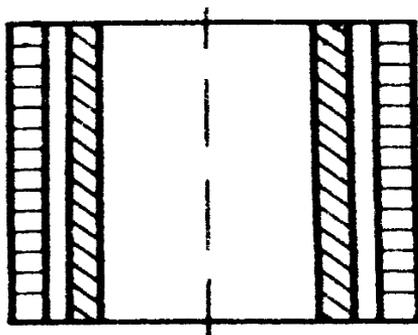


Рис.3 Эскиз соленоидального индуктора

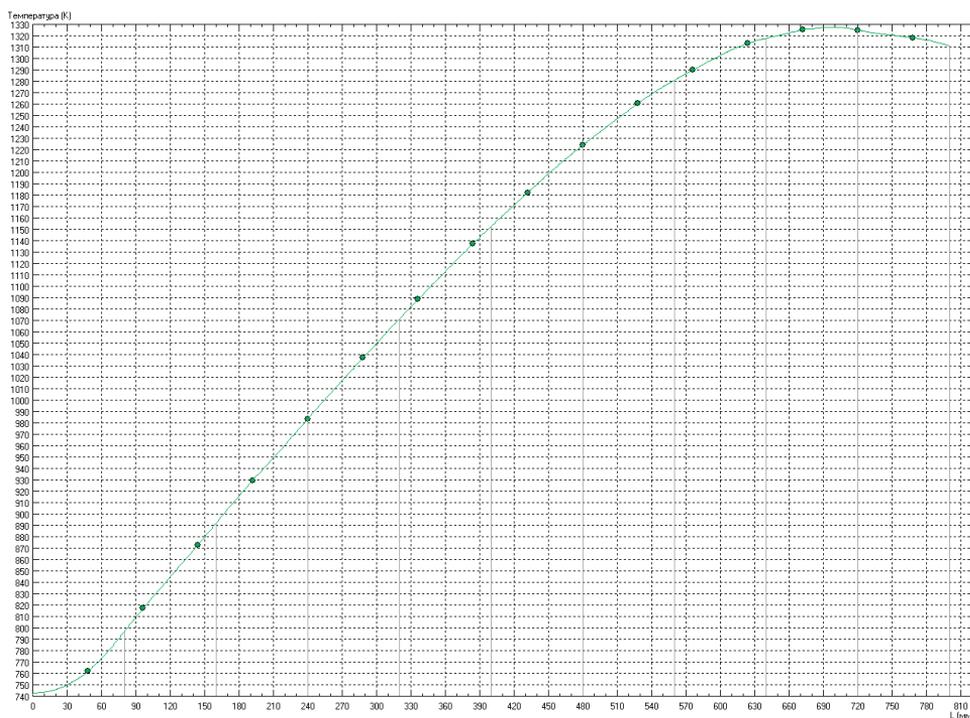


Рис. 4 График температуры на боковой поверхности колец

Таким образом, использование индуктора с С-образным сердечником не позволяет достигнуть желаемых результатов, а использование соленоидального индуктора даёт возможность получить требуемые значения температур для данной задачи.

Библиографический список:

1. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.; ил.
2. Слухоцкий А.Е. и Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: «Энергия», 1974. – 264 с.; ил.