

УДК 621.313

**КОНСТРУКЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ АКСИАЛЬНОГО ИНДУКТОРА  
МАГНИТОТУРБОТРОНА**

**DESIGN AND FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING OF  
THE AXIAL INDUCTOR OF MAGNETOTURBOTRON**

**Гайтов Багаудин Хамидович**

доктор технических наук,  
заслуженный деятель науки и техники РФ,  
профессор кафедры электротехники  
и электрических машин  
Кубанского государственного  
технологического университета  
Тел.: (861) 233-73-43

**Самородов Александр Валерьевич**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры электротехники  
и электрических машин  
Кубанского государственного  
технологического университета  
Тел.: (861) 233-73-43, 8(918) 434-02-94  
set@id-yug.com

**Копелевич Лев Ефимович**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры электротехники  
и электрических машин  
Кубанского государственного  
технологического университета  
Тел.: (861) 233-73-43, 8(918) 434-21-46

**Кашин Яков Михайлович**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры электротехники  
и электрических машин  
Кубанского государственного  
технологического университета  
Тел.: (861) 233-73-43, 8(965) 470-14-96

**Аннотация.** В статье приводятся конструкция и основные энергетические соотношения для магнитотерапевтических установок аксиальной конструкции.

**Ключевые слова:** электромеханические преобразователи энергии магнитная терапия, магнитотурботрон.

**Gaytov Bagaudin Khamidovich**

Ph. D., Professor of electrical engineering  
and electrical machines  
Kuban State University of Technology  
Tel.: (861) 233-73-43

**Samorodov Alexander Valerievich**

Ph. D., Associate Professor of electrical  
engineering and electrical machines  
Kuban State University of Technology  
Tel.: (861) 233-73-43, 8(918) 434-02-94  
set@id-yug.com

**Kopelevich Lev Efimovich**

Ph. D., Associate Professor of electrical  
engineering and electrical machines  
Kuban State University of Technology  
Tel.: (861) 233-73-43, 8(918) 434-21-46

**Kashin Yakov Mikaylovich**

Ph. D., Associate Professor of electrical  
engineering and electrical machines  
Kuban State University of Technology  
Tel.: (861) 233-73-43, 8(965) 470-14-96

**Annotation.** The article provides design  
and basic energy relations for  
magnetotherapy installations axial design.

**Keywords:** Electromechanical energy  
converters, magnetic therapy,  
magnetoturbotron.

Магнитотурботрон (МТТ) относится к медицинской технике и предназначен для лечебного воздействия бегущим магнитным полем на онкологических больных. Аксиальная конструкция разработанного МТТ позволяет одновременно воздействовать на

несколько пациентов. Это достигается тем, что ферромагнитный магнитопровод индуктора, используемый как ложе для пациентов, выполнен в виде статора аксиального асинхронного двигателя с радиально расположенными пазами для трехфазной обмотки. На ложе в радиальном направлении располагается несколько, например, шесть, десять, двенадцать и т.д. пациентов, над которыми расположен щит, выполненный эластичным в виде одеяла из ферромагнитного порошка, позволяющего повторять контуры тела человека.

На рисунке 1 приведена конструкция разработанного МТТ (вид сверху), на рисунке 2 – разрез аксиального магнитопровода МТТ (вид А-А).

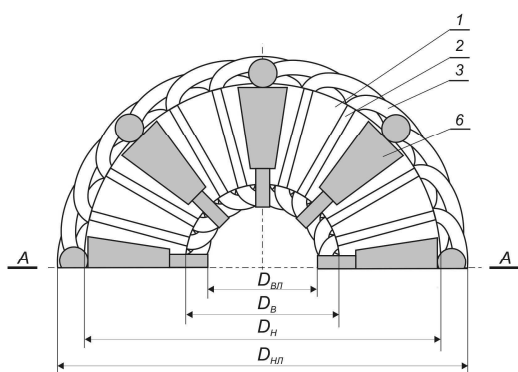


Рисунок 1 – Магнитотурботрон аксиальной конструкции (вид сверху)

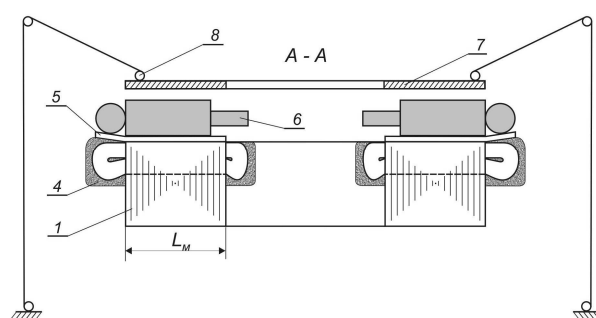


Рисунок 2 – Магнитотурботрон аксиальной конструкции (разрез А-А)

Магнитотурботрон (рис. 1) состоит из аксиального магнитопровода индуктора 1 с радиально расположенными пазами 2, в которые уложена трехфазная обмотка 3, как в известном аксиальном трехфазном двигателе переменного тока, которая покрыта компаундом 4 (рис. 2). Для удобства размещения пациентов предусмотрена подстилка 5 (рис. 2), например, поролоновый матрац. Пациенты 6 располагаются на этом матраце непосредственно над магнитопроводом в радиальном направлении, причем, ногами к центру, а головой к периферии. Для увеличения воздействия магнитного поля на все системы и органы пациентов, а также обеспечения сквозного прохождения магнитного потока через их тела, сверху устанавливается щит 7 (ярмо), выполненный в виде одеяла из ферромагнитного порошка эластичным и позволяющим повторять контуры тела пациента. Для удобства размещения пациентов ярмо выполняется подъемным, с возможностью регулирования расстояния между ним и магнитопроводом с помощью устройства 8 (рис. 2).

МТТ работает следующим образом: на зажимы обмотки 3 индуктора 1 подается переменное трехфазное напряжение, величина и частота которого зависят от требуемой скорости движения и интенсивности магнитного поля. Возникающее вращающееся магнитное поле проходит через тела пациентов 6 и, замыкаясь с помощью ярма 7, оказывает лечебное воздействие на все органы и системы пациентов.

Данная конструкция МТТ при достаточной простоте изготовления обладает более высокой производительностью, чем магнитотерапевтическая установка с магнитопроводом традиционной (радиальной) конструкции. Кроме того, использование в качестве ярма эластичного щита-одеяла сводит воздушные зазоры между индуктором и пациентами, а, следовательно, и потоки рассеяния, до минимума, тем самым значительно улучшает энергетические показатели (КПД,  $\cos\phi$ ) и повышает производительность установки в целом.

Геометрические размеры МТТ рассчитываются, исходя из следующих допущений и требований: облучению магнитным полем одновременно подвергается несколько пациентов. На уровне ног на каждого пациента должно приходиться около 40 см вдоль дуги магнитопровода на уровне внутреннего диаметра  $D_в$ ; на уровне плеч – около 80 см на уровне внешнего диаметра  $D_н$ . Голова каждого пациента должна подвергать-

ся меньшему облучению магнитным полем, чем любая другая часть тела, поэтому голова должна находиться на наружных лобовых частях обмотки (диаметр  $D_{нл}$ ), а ноги – на внутренних лобовых частях обмотки (диаметр  $D_{вл}$ ). С этой целью наружные и внутренние лобовые части обмотки покрываются специальным компаундом так, чтобы полностью изолировать в электрическом и тепловом отношении пациентов от обмотки, причем компаунд лобовых частей выполняется в виде подушки под голову пациента. Расстояние между головами соседних пациентов желательно иметь около 150–200 см.

Принцип, заложенный в конструкцию данного МТТ, теоретически позволяет создавать установки для одновременного лечения сколь угодно большого числа пациентов, что представляется весьма существенным с точки зрения повышения производительности, сокращения необходимой площади процедурного кабинета, резкого сокращения магнитного потока рассеяния и экономии электроэнергии.

В связи с тем, что представленное выше устройство принципиально отличается от широко распространенных и достаточно глубоко изученных электрических машин переменного тока (синхронных и асинхронных), то рассматриваемый индуктор является предметом самостоятельных исследований, как в статических, так и в динамических режимах работы. В последнем случае имеется ввиду непрерывно изменяющаяся напряженность (индукция) магнитного поля в месте расположения пациента в течении всего периода процедуры магнитотерапии.

В силу необычности конструкции, параметров вторичной цепи – пациента – и особенностей режима работы индуктора МТТ значительный интерес представляет его математическая модель. При этом следует иметь ввиду, что правильный выбор системы координат для исследования математической модели в переходных режимах определяет сложность получаемых дифференциальных уравнений, а, следовательно, трудоемкость их решений и точность получаемых результатов.

С позиций электромеханики индуктор МТТ представляет собой статор асинхронной машины и специфичный немагнитный невращающийся (заторможенный относительно поля индуктора) ротор, в качестве которого предполагаются пациенты. Практически это означает, что индуктор МТТ совместно с пациентами представляет собой заторможенную (неподвижную) активно-индуктивно-емкостную систему. Причем, активно-индуктивную составляющую этой системы представляет собой индуктор (статор), а активно-емкостную – пациенты. При этом магнитное поле статора (индуктора) вращается с синхронной частотой вращения

$$n = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \cdot 100}{1} = 6000 \text{ об/мин.} \quad (1)$$

Исходя из сказанного, представляется, что рациональной системой для моделирования индуктора совместно с пациентами является неподвижная система координат  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ . При этом характерны следующие особенности, которые следует учесть при составлении дифференциальных уравнений математической модели системы «индуктор-пациенты»:

- отсутствует какое-либо взаимное перемещение пациентов по направлению (или встречно) вращению магнитного поля индуктора, т.е. пациенты заторможены. Такое положение приводит к отсутствию в математической модели индуктора МТТ ЭДС вращения, характерных для электрических машин традиционной конструкции;

- отсутствие вращательного движения пациентов относительно индуктора исключает необходимость в описании электромеханического процесса в нем.

Таким образом, обобщенная математическая модель МТТ представляет собой модель собственно аксиального индуктора, питаемого от преобразователя частоты модулированным напряжением  $U = 0 \div 220$  В, частотой  $f = 100$  Гц, на магнитопроводе которого в радиальном направлении размещаются пациенты.

При составлении математической модели индуктора МТТ совместно с пациентами (назовем ее комплексной математической моделью МТТ) примем следующие допущения: индуктор МТТ симметричен, имеет гладкие внутреннюю и наружную поверхности магнитопровода, содержит синусные обмотки, а также одинаковый коэффициент

взаимной индуктивности между обмотками индуктора и контуром вихревых токов в телах пациентов. При этом заметим, что вихревые токи, возникающие в телах пациентов в результате воздействия вращающимся магнитным полем (ВМП), имеют емкостной характер.

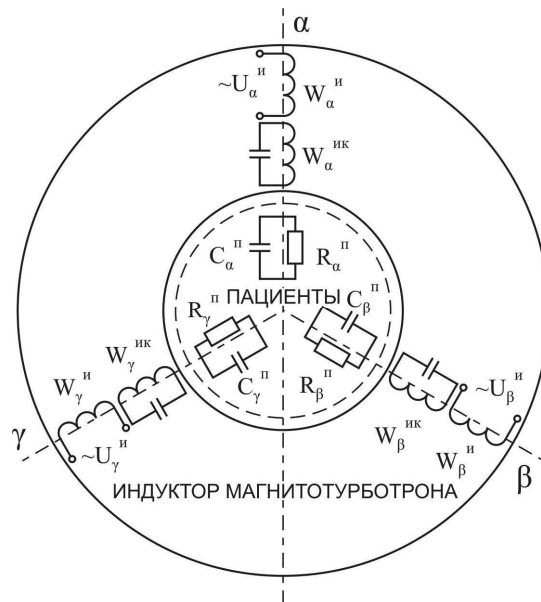
При составлении математической модели индуктора МТТ совместно с пациентами учтем неизбежные замыкания между собой отдельных элементов электротехнической стали ленты в магнитопроводе индуктора, вызванные механической обработкой при выфрезеровывании пазов с последующей шлифовкой торцевых поверхностей магнитопровода. Последнее можно учесть введением в математическую модель индуктора дополнительного короткозамкнутого контура.

Модуляцию напряжения, питающего индуктор МТТ, учтем введением параметра напряжения индуктора  $\gamma$ , равного

$$\gamma = \frac{U_i^u}{U_N^u}, \quad (2)$$

где  $U_i^u$  – текущее значение напряжения индуктора;  $U_N^u$  – номинальное значение напряжения индуктора.

Пространственная электрическая модель аксиального индуктора МТТ с расположенными на нем в радиальном направлении пациентами приведена на рисунке 3.



**Рисунок 3** Пространственная электрическая модель индуктора аксиального магнитотурботрона:

$U_\alpha^u = var$ ,  $U_\beta^u = var$ ,  $U_\gamma^u = var$  – модулируемые фазные напряжения питания индуктора МТТ, причем  $U_\alpha^u = U_\beta^u = U_\gamma^u$ ;  $W_\alpha^u = W_\beta^u = W_\gamma^u$  – число витков фазы индуктора по осям  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ;  $W_\alpha^{uk} = W_\beta^{uk} = W_\gamma^{uk}$  – число витков фиктивной короткозамкнутой обмотки индуктора, имитирующей короткое замыкание пластин магнитопровода индуктора в процессе его механической обработки;  $C_\alpha^n$ ,  $C_\beta^n$ ,  $C_\gamma^n$  – электрическая емкость тел пациентов по осям  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ;  $R_\alpha^n$ ,  $R_\beta^n$ ,  $R_\gamma^n$  – электрическое (активное) сопротивление тел пациентов по координатным осям  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ;  $\omega^u$  – угловая скорость вращения магнитного поля индуктора

Заметим, что в отличие от обычных электрических машин обязательно содержащих неподвижный статор и вращающийся ротор, магнитотурботрон содержит лишь один индуктор в виде статора машины переменного тока, а вместо ротора размещаются пациенты, в электрическом отношении представляющие собой комбинацию из емкости  $C^n$  и активного сопротивления  $R^n$ . При этом обычная электромагнитная связь между первичным и вторичным контурами в индукторе МТТ отсутствует, что существенно упрощает его модель. С другой стороны, отсутствие какого-либо электроме-

нического процесса вращения в индукторе МТТ не требует никакого преобразования полученной на рисунке 3 пространственной электрической модели аксиального магнитотурботрона.

Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений напряжений индуктора, с учетом его короткозамкнутого контура и активно-емкостного характера тел пациентов.

Результирующие потокосцепления описываются системой уравнений, в которой каждое уравнение содержит один член с собственной индуктивностью и два члена – с взаимными индуктивностями двух других фаз обмотки индуктора. При этом заметим, что индуктивная связь обмотки индуктора с телами пациентов, расположенными над магнитопроводом (аналогично тому, как располагается ротор аксиальных асинхронных машин над магнитопроводом статора) практически отсутствует, так как отсутствует электромагнитная связь между ними из-за отсутствия индуктивной составляющей в телах пациентов.

#### **Литература:**

1. Гайтов Б.Х. Моделирование и расчет температурного поля специальных электрических машин для систем автономного электроснабжения / Б.Х. Гайтов, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, В.А. Иванюк // Изв. вузов. Электромеханика. – 2006. – № 5. – С. 24–27.
2. Ермак А.А. Магнитотурботрон аксиальной конструкции / А.А. Ермак, А.В. Самородов, М.Л. Копелевич.
3. Гайтов Б.Х. Магнитотерапевтическая установка / Б.Х. Гайтов, С.Д. Синицкий, Т.Б. Гайтова, А.В. Самородов, В.Т. Эльмутиз // патент на изобретение RUS 2153368 31.03.1999.
4. Бахмутский Н.Г. Влияние вихревого магнитного поля на периферические лимфатические узлы в эксперименте / Н.Г. Бахмутский, В.Н. Бодня // Медицинская физика. – 2011. – № 4(52). – С. 50–57.

#### **References:**

1. Gaytov B.Ch. Modeling and calculation of a temperature field of special electric cars for systems of autonomous power supply / B.Ch. Gaytov, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov, V.A. Ivanuk // Izv. vuzov. Electromecanics. – 2006. – № 5. – P. 24–27.
2. Ermak A.A. Magnitoturbotron of an axial design / A.A. Ermak, A.V. Samorodov, M.L. Kopelevich.
3. Гайтов Б.Х. Magnetotherapeutic installation / B.Ch. Gaytov, S.D. Sinickiy, T.B. Gaytova, A.V. Samorodov, V.T. El'mutaz // patent for the invention RUS 2153368 31.03.1999.
4. Bachmutskiy N.G. Influence of a vortex magnetic field on peripheral lymph nodes in experiment / N.G. Bachmutskiy, V.N. Bodnya // Medical physics. – 2011. – № 4(52). – С. 50–57.