

Разработка магнитной системы реле переменного тока на основе ресурсосберегающей технологии

ТИМОФЕЕВ И.А., РОЗАНОВ Ю.К., КУСТОВ Е.Ф.

Выявлены закономерности фазоамплитудного явления сдвига магнитных потоков в сердечнике магнитной системы при дискретном прессовании магнитных систем. Изложены теоретические аспекты создания матричной формализации процесса прессования слоистых магнитных материалов и показана эффективность предложенной конструкции. Результаты выполненных исследований могут явиться существенным вкладом в развитие физики магнетизма.

Ключевые слова: реле переменного тока, магнитные системы, слоистые магнитные материалы, прессование, матричная формализация

Магнитопроводы сердечников и якорей электрических аппаратов, в частности реле РПУ-1, выпускаемых в настоящее время, шихтованные, т.е. собираются из тонких листов электротехнических сталей, получаемых штамповкой. Однако данный метод — не из дешевых, хотя бы потому, что до 40% электротехнической стали идет в отходы. Методы порошковой металлургии позволяют получать магнитные системы по безотходной технологии, синтезировать материалы с широким набором химических элементов, выпускать детали сложной формы, формовать и спекать изделия до 8 класса точности. Традиционными методами — литейным процессом с последующей, например, прокатной, магнитные системы, обладающие высокими физико-механическими свойствами, получить нельзя.

Таким образом, для совершенствования существующих и промышленного освоения производства новых магнитных систем, а также в связи с расширением номенклатуры объема и программы применяемых магнитных систем необходимо их дальнейшее исследование.

Для практического использования электрический аппарат с однофазной системой должен иметь магнитную систему со сдвинутыми по фазе магнитными потоками. Но системы, собранные из листов одного материала, не позволяют получить такой сдвиг магнитных потоков. Особенности изготовления электромагнита переменного тока обусловлены наличием на его расщепленном полюсе КЗ витка, предназначенного для реализации такого сдвига фаз и соответственно для устранения вибрации якоря во включенном состоянии [1]. Однако при эксплуата-

Regularities pertinent to the phase-amplitude phenomenon of a shift of magnetic fluxes occurring in a magnetic system's core when magnetic systems are pressed in a discrete manner are considered. The theoretical aspects of developing and formalizing the magnetic material pressing process are outlined, and the effectiveness of the proposed construction is demonstrated. The results of the performed investigations can serve as an essential contribution in development of the physics of magnetism.

Key words: AC relay, magnetic systems, lamellate magnetic materials, pressing, matrix formalization

ции электромагнита переменного тока КЗ виток оказывается ненадежной деталью: часто происходит его поломка, износ или выпадение из гнезда.

Неординарные явления обнаружены при системном исследовании матричной формализации процесса прессования слоистых магнитных материалов, которая дает возможность формировать градиентные свойства изделий. Для этого была разработана математическая модель, на которой при изучении дискретного прессования слоев магнитных систем был зафиксирован эффект фазоамплитудного сдвига магнитных потоков в сердечнике магнитной системы. Разработан алгоритм теоретического расчета и изложена физическая сущность явления сдвига магнитных потоков в сердечнике магнитной системы. На базе выявленного эффекта были спроектированы новые конструкции образцов магнитопроводов для систем переменного тока.

Рассмотрим случай, когда отдельный слоистый лист пронизывает переменный синусоидальный магнитный поток Φ . Этот поток индуцирует электродвижущие силы, под действием которых возникают вихревые токи, направленные таким образом, что созданное ими магнитное поле, с одной стороны, ослабляет и искажает исходное поле, а с другой, создает фазовый сдвиг магнитных потоков.

Расположим оси координат так, как показано на рис. 1, т.е. вектор \vec{E} параллелен оси OX , вектор \vec{H} параллелен оси OY , а вектор Пойнтинга направлен внутрь листа. Примем, что начало координат находится в центре сечения листа. При размерах h и $l \gg d$ электромагнитную волну можно считать плоской.

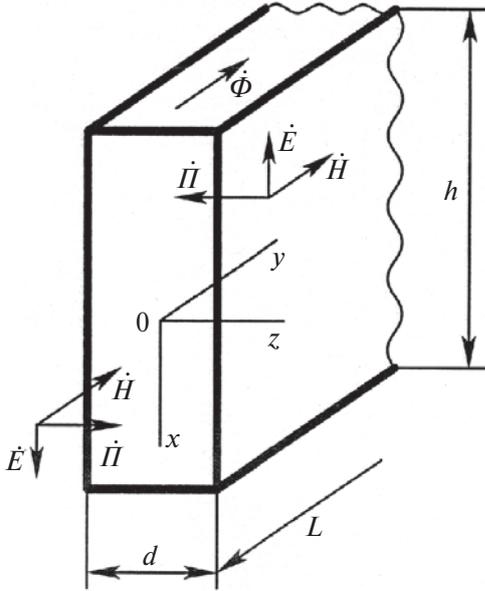


Рис. 1. Картина проникновения электромагнитной волны в активный слой магнитопровода (фрагмент)

Расчет электромагнитного поля основывается на решении уравнений Максвелла при заданных граничных и начальных условиях. Уравнения Максвелла для переменного электромагнитного поля имеют вид:

$$\text{rot}H = d = gE; \text{rot}E = - \frac{dB}{dt} = - m \frac{dH}{dt}. \quad (1)$$

В общеизвестных уравнениях (1) векторы \vec{H} и \vec{E} изменяются по всем трем осям x, y, z , однако выделим и запишем значения комплексных амплитуд \dot{H}_m и \dot{E}_m в магнитной системе слоистого листа в зависимости от одной координаты z и затем найдем производные для напряженностей магнитного и электрического полей [2, 3]:

$$- \frac{d\dot{H}_m}{dz} = g\dot{E}_m; \frac{d\dot{E}_m}{dz} = - j\omega m \dot{H}_m. \quad (2)$$

Проведя дифференцирование первого уравнения по z с учетом второго уравнения, найдем

$$\frac{d^2 \dot{H}_m}{dz^2} = - j\omega m g \dot{H}_m. \quad (3)$$

Общее решение этого уравнения с постоянными коэффициентами имеет вид [2, 3]:

$$\dot{H}_m = A_1 e^{-az} + A_2 e^{+az}, \quad (4)$$

где $a = \sqrt{j\omega m g}$ — корень характеристического уравнения

Учитывая, что $\sqrt{j} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 + j)$ и обозначая волновое число $k = \sqrt{\frac{\omega m g}{2}}$, получаем

$$a = (1 + j)\sqrt{\frac{\omega m g}{2}} = (1 + j)k.$$

Принимаем второй член в уравнении (4) $A_2 = 0$, так как напряженность не может возрастать до бесконечности, поэтому $\dot{H}_m = A_1 e^{-az}$. Постоянную A_1 находим из условия $z=0$, при этом $A_1 = \dot{H}_m$. Решение уравнения (4) имеет вид [2, 3]:

$$\dot{H}_m = \dot{H}_m e^{-kz} e^{-j kz}. \quad (5)$$

Выражение для напряженности электрического поля находим из уравнения (2):

$$\dot{E}_m = \frac{1}{g}(1 + j)k \dot{H}_m e^{-kz} e^{-j kz}, \quad (6)$$

так как $\frac{1}{\sqrt{2}}(1 + j) = e^{j\frac{\pi}{4}}$ и $\frac{1}{g}(1 + j)k = \sqrt{\frac{\omega m}{g}} e^{j\frac{\pi}{4}}$.

Волновое сопротивление для слоистого листа оказывается комплексным и равным

$$z = \frac{E_m}{H_m} = \frac{(1 + j)k}{g} = (1 + j)\sqrt{\frac{\omega m}{2g}}. \quad (7)$$

При монодискретном прессовании магнитопроводы выполняли в виде периодически прессованных пакетов, причем каждый слой, начиная с первого, прессовали с последовательным уменьшением усилия прессования так, что давление на каждый последующий слой отличалось от предыдущего на постоянную величину, а после каждого слоя аэрозольным напылением наносили изолирующий материал [4]. Значение давления прессования, соответствующее m -му дискретному слою, можно рассчитать по формуле

$$P_{ij} = P_{i1} - DP(m - 1), \quad (8)$$

где P_{ij} — давление прессования j -го слоя; P_{i1} — давление прессования первого слоя; DP — снижение давления; DP^i ($i \in \mathbb{N}; 0 \leq i < \mathbb{N}$); i — номер пакета магнитопровода; $i = 1, 2, 3, \dots, n$; j — номер слоя пакета; $j = 1, 2, 3, \dots, m$.

Значение снижения давления можно изменять в широких пределах.

Монодискретное прессование магнитопровода осуществляется при следующих элементах матричной схемы:

элементы строк

$$\left. \begin{array}{l} D_{11} > D_{12} > D_{13} > \dots > D_{1j} > D_{1m} \\ D_{21} > D_{22} > D_{23} > \dots > D_{2j} > D_{2m} \\ D_{31} > D_{32} > D_{33} > \dots > D_{3j} > D_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_{i1} > D_{i2} > D_{i3} > \dots > D_{ij} > D_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_{n1} > D_{n2} > D_{n3} > \dots > D_{nj} > D_{nm} \end{array} \right\} \quad (9)$$

элементы столбцов

$$\left. \begin{array}{l} D_{11} = D_{12} = D_{13} = \dots = D_{1j} = D_{n1} \\ D_{21} = D_{22} = D_{23} = \dots = D_{2j} = D_{n2} \\ D_{31} = D_{32} = D_{33} = \dots = D_{3j} = D_{n3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_{1j} = D_{2j} = D_{3j} = \dots = D_{ij} = D_{nj} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_{1m} = D_{2m} = D_{3m} = \dots = D_{im} = D_{nm} \end{array} \right\} \quad (10)$$

Методы исследования. Исследовались конструкции прессованных магнитных систем для промежуточного электромагнитного реле РПУ-1. Магнитные характеристики определялись индукционным методом (регламентируется ГОСТ 12119). Магнитные свойства изучались с помощью звукового генератора ГЗ-34 при частоте 50 Гц. Магнитные измерения проводились методом амперметра—вольтметра (электронный миллиамперметр типа Ф-563 и электронный вольтметр типа Ф-534).

Для изготовления магнитопроводов использовался гидравлический пресс колонного типа 2ПГ-500, позволяющий реализовать давление до 5000 МПа на всю контактную поверхность.

Спекание проводилось в камерной печи сопротивления типа СНВЛ-1.3.1/1-М2 в вакууме $0,065 \times 10^{-2}$ Па при температуре 1623 К. При создании кристаллизации и рекристаллизации сплава было использовано математическое моделирование. При изготовлении сердечника и якоря магнитной системы был применен метод Монте-Карло для разработки оптимальной технологии прессования и спекания [7].

Для исследования на первый прессованный слой Ш-образного сердечника, где было применено давление 2450 ± 90 МПа, был установлен один датчик с числом измерительных витков, равным трем, а второй датчик с таким же числом измерительных витков был установлен на второй смежный прессованный слой, где давление достигало 2250 ± 80 МПа. Аналогичные измерения были повторены на других смежных слоях.

Фазовый сдвиг магнитных потоков исследовался путем измерения линейной развертки при подаче напряжений на входы каналов вертикального отклонения двухлучевого осциллографа С1-83 [8].

Объект исследований. Для исследований были созданы магнитные системы, состоящие конструктивно из Ш-образного сердечника и якоря прямоугольной призматической формы [11]. Целью системных исследований была разработка магнитной системы реле РПУ-1, выполненной так же, как стандартная магнитная система из тонких листов, но полученная методом порошковой металлургии. В итоге была создана так называемая критическая технология, заключающаяся в следующем. Сердечник и якорь магнитопровода для реле прессуют из порошковой шихты 3% Si и 97% Fe в виде периодически прессованных пакетов, которые отличаются тем, что прессование каждого пакета магнитопровода проводят при давлении, начиная с 2450 ± 90 МПа и кончая 550 ± 20 МПа, причем при переходе от слоя к слою давление прессования последовательно уменьшают на 200 ± 10 МПа, а после каждой операции прессования на поверхность слоя наносят изолирующий материал путем аэрозольного распыления.

Сердечник магнитопровода был выполнен со следующими размерами: длина 48×10^{-3} м, высота 32×10^{-3} м. При этом ширина двух крайних кернов по 7×10^{-3} м, ширина среднего керна 10×10^{-3} м, высота перемычки в основании сердечника для прохождения магнитного потока от среднего керна к крайним кернам равнялась 6×10^{-3} м.

Якорь магнитопровода имел следующие размеры: длина 48×10^{-3} м, высота 6×10^{-3} м. Якорь и сердечник были выполнены одинаковой толщиной, равной 14×10^{-3} м, имели по 28 слоев толщиной $0,5 \times 10^{-3}$ м каждый. Ширина окна магнитопровода для установки катушки на средний kern равна 12×10^{-3} м. Якорь и сердечник были установлены в обойму корпуса реле РПУ-1.

Стандартный сердечник реле РПУ-1 на крайних кернах имеет два КЗ витка, изготовленных из латуни, каждый сечением $(4,5 \times 1,0) \times 10^{-6}$ м и длиной 54×10^{-3} м, а полученная нами прессованная магнитная система тех же размеров не предусматривает установку таких витков. Поэтому на серийно выполненном реле РПУ-1 для установки КЗ витков на кернах сердечника имеется прямоугольный паз длиной 5×10^{-3} м, шириной 2×10^{-3} м и глубиной 14×10^{-3} м.

Втягивающая катушка на напряжение 220 В и 50 Гц имеет 5700 витков, ее сопротивление 509 ± 18 Ом. Катушка намотана проводом марки ПЭТВ-2 диаметром $0,14 \times 10^{-3}$ м.

Пример технологического процесса изготовления магнитной системы. Технология прессования сердечника якоря была следующей. В матрицу пресс-формы, имеющей нижний пуансон, из бункера-питателя засыпают рассчитанную навеску шихты [10]. После заполнения шихтой внутренней полости матрицы пресс-формы и разравнивания слоя шихты питатель отводят в сторону и проводят прессование первого слоя магнитопровода верхним пуансоном при опускании плунжера прессы под давлением 2450 ± 90 МПа. Затем поднимают верхний пуансон и в матрице пресс-формы на поверхность первого слоя магнитопровода напыляют слой аэрозоля толщиной 40 мкм из пудры окиси магния. Далее в матрицу пресс-формы автоматически засыпают следующую дозу навески шихты и проводят прессование второго слоя магнитопровода под давлением 2250 ± 80 МПа, после чего напыляют второй слой диэлектрической прослойки также толщиной 40 мкм. Следующие слои прессуют в том же порядке только при давлении 2050 ± 75 и 1850 ± 70 МПа.

Операцию послойной засыпки второго пакета магнитопровода проводят таким же образом, как и для первого пакета, и прессование проводят при следующих значениях давления: 1800 ± 65 ; 1600 ± 60 ; 1400 ± 50 ; 1200 ± 45 МПа. Послойная засыпка третьего пакета магнитопровода аналогична, но прессование проводят при давлении 1150 ± 40 ; 950 ± 35 ; 750 ± 30 ; 550 ± 20 МПа.

Схему прессования рассчитывают таким образом, чтобы последний слой выполняли при давлении не ниже 500 МПа, так как в противном случае не обеспечивается прочность прессовки. После окончания прессования дискретно изготовленные сердечники и якоря выпрессовывают из пресс-форм и устанавливают в контейнеры для спекания.

При решении вопросов спекания сердечника и якоря была использована теория Г. Эринга и М. Поляни (теория абсолютных скоростей реакций) [5], исходя из которой возникает конфигурация атомов, при которой происходит движение атомов беспрепятственно, без расхода энергии. Эта теория позволила вычислить зависимость скорости реакции спекания от температуры. Механизм стягивания твердых частиц порошка жидкими прослойками обусловлен капиллярным давлением, которое по закону П. Лапласа (теория стягивания твердых частиц, обусловленных капиллярным давлением) [6], определяется следующей зависимостью:

$$DP = s(1/R_1 + 1/R_2), \quad (11)$$

где s — поверхностное натяжение жидкой фазы и газа; R_1 и R_2 — главные радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных нормальных сечений поверхности.

Особенность разработанной критической технологии спекания и термообработки заключается в том, что контейнеры с деталями помещают в камерную печь сопротивления и спекают в вакууме ($0,065 \times 10^{-2}$ Па) при температуре 1350 ± 20 °С [10]. Затем образцы охлаждают до 850 ± 20 °С со скоростью не более 100 ± 5 °С/ч, далее с температуры 850 ± 20 °С до 650 ± 20 °С — при скорости не более 50 ± 5 °С/ч, с температуры 650 ± 20 °С до комнатной температуры — со скоростью 200 ± 10 °С/ч. При отступлении от разработанной технологии спекания нарушается сингулярность процесса формирования идеальной структуры магнитопровода.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Сравнительному исследованию были подвергнуты серийно изготовленные электромагнитные реле типа РПУ-1 с магнитными системами из электро-технической холоднокатаной анизотропной стали 3411 (Э-310), на которых предусмотрены по два КЗ витка, и аналогичные по размерам прессованные магнитные системы, изготовленные методом порошковой металлургии (без КЗ витков).

Эффективность функционирования магнитных систем можно оценить по их рабочим характеристикам. На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость угла сдвига фаз Dj магнитных потоков от разности давления прессования. Из рисунка видно, что с увеличением разности давления прессования адекватно увеличивается угол сдвига фаз магнитных потоков. При угле до 30° якорь реле вибрирует и гудит, а затем реле функционирует нормально.

Сопоставлялись и тяговые характеристики, причем они были сняты с одной и той же втягивающей катушкой для реле РПУ-1 с магнитопровода $\Delta\phi$, град

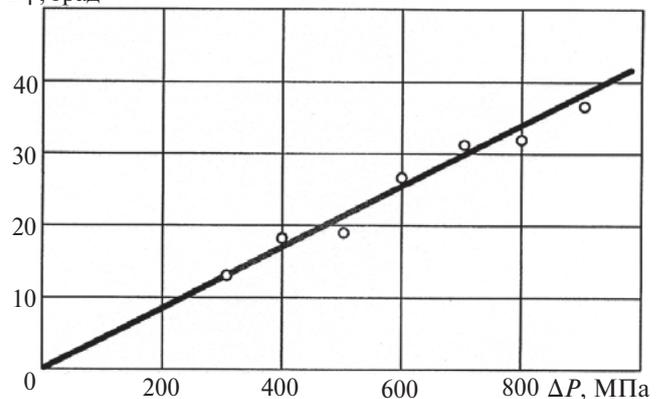


Рис. 2. Зависимость угла сдвига фаз магнитных потоков Dj от разности давления прессования слоев спеченного магнитопровода DP

ми из слоистого материала и электротехнической холоднокатаной анизотропной стали марки 3411 (Э-310), геометрии которых аналогичны серийным образцам (рис. 3). Достоинство прессования с эквидистанционной вариацией давления состоит в том, что тяговая характеристика электромагнита, измеренная в этой системе, превышает тяговую характеристику электромагнита, магнитная система которого выполнена на основании безвариационного давления прессования, на которых установлены по два КЗ витка.

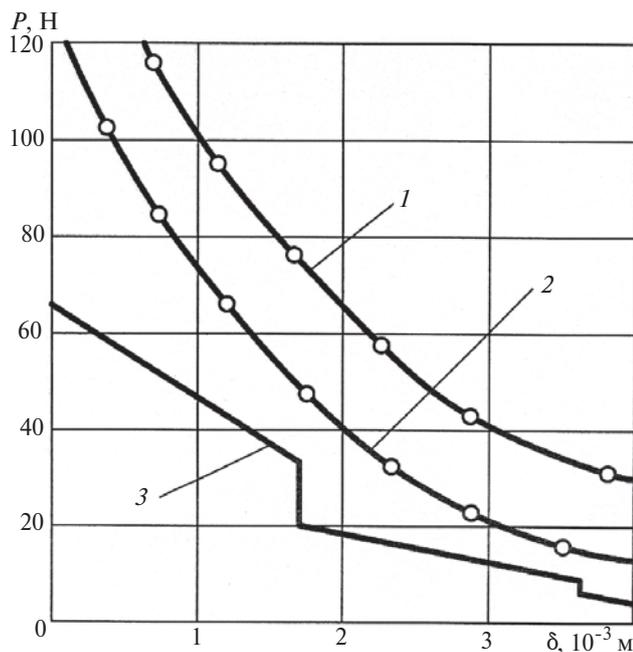


Рис. 3. Зависимость тягового усилия P от зазора между якорем и сердечником: 1 — для слоистой магнитной системы из материала 3% Si и 97% Fe; 2 — для магнитной системы из электротехнической стали 3411 (Э-310); 3 — противодействующая характеристика реле

Кроме того, были измерены магнитные потоки в слоях сердечника, изготовленных при различных значениях давления прессования. Измерения показали, что в разомкнутой магнитной системе, изготовленной методом порошковой металлургии, где давление на слое составляло 2490 ± 90 МПа, магнитный поток был равен $6,6 \times 10^{-3}$ мВб, а на втором смежном слое, где было применено давление 2250 ± 80 МПа, магнитный поток составлял $5,9 \times 10^{-3}$ мВб. В традиционной разомкнутой магнитной системе, где была применена электротехническая холоднокатаная анизотропная сталь марки 3411 (Э-310), магнитный поток был равен $4,3 \times 10^{-3}$ мВб.

Таким образом, на основании обнаруженного эффекта сдвига магнитных потоков как по фазе, так и по амплитуде [11] предложен новый способ организации функционирования электромагнитно-

го реле без установки КЗ витков на магнитной системе.

Благодаря этому эффекту возможно изготавливать магнитные системы из порошка одного и того же исходного материала при использовании различного давления прессования, но без установки КЗ витков.

Выводы. 1. Разработана математическая модель и предложена матричная формализация различных технологических процессов прессования слоистых магнитных материалов для магнитных систем и осуществлены практические методы их дискретного прессования.

2. Системные исследования на порошковых магнитных материалах показали, что при дискретном прессовании слоистых магнитных материалов для магнитных систем опытным путем впервые выявлен физический эффект сдвига магнитных потоков как по фазе, так и по амплитуде, позволяющий впервые из порошка изготавливать магнитные системы для их функционирования без установки КЗ витков.

3. Магнитопроводы, изготовленные по новому способу на основе нового эффекта, могут заменить существующие стандартные магнитопроводы в следующих электротехнических изделиях и устройствах: реле, контакторы, магнитные пускатели, однофазные двигатели с расщепленными полюсами, вентиляторы, электродвигатели кинопроекторных аппаратов, самопишущие приборы, механизмы электрических часов и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты переменного тока. — М.: Энергия, 1968.
2. Блажкин А.Т. Общая электротехника. — Л.: Энергия, 1971.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. — М.: Высшая школа, 1986.
4. А.с. 624721 (СССР). Способ изготовления магнитопроводов/И.А. Тимофеев, Д.Д. Мишин. — БИ, 1978, № 35.
5. Глестон С., Лейдлер К., Эринг Г. Теория абсолютных скоростей реакции. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1948.
6. Адам Н.К. Физика и химия поверхностей. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1947.
7. Соболев И.М. Численные методы. — М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1973.
8. Нефедов В.И., Сигов А.С., Битюков В.К. и др. Метрология и радиоизмерения/Под ред. В.И. Нефедова. — М.: Высшая школа, 2006.
9. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. — М.: Высшая школа, 1991.
10. Мишин Д.Д., Тимофеев И.А. Изготовление металлокерамических магнитопроводов для систем переменного тока. — ЭП. Технология электротехнического производства, 1978, вып. 1 (104).
11. Тимофеев И.А. Физический эффект сдвига магнитных потоков как по фазе, так и по амплитуде в сердечнике магнитной системы. — Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2009, № 3.

12. Тимофеев И.А., Кустов Е.Ф. К разработке магнитопровода для маломощного трансформатора напряжения. – Электротехника, 2008, № 3.

[31.01.12]

А в т о р ы : Тимофеев Игорь Александрович окончил электротехнический факультет Кировского политехнического института в 1970 г. В 2008 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка технологий изготовления порошковых магнитных материалов для электротехнических изделий» в Московском энергетическом институте (МЭИ). Профессор кафедры «Машиноведение» Чувашского государственного педагогического университета.

Розанов Юрий Константинович окончил электромеханический факультет МЭИ в 1962 г. В 1988 г. защитил докторскую диссертацию «источники питания в системах автоматического энергоснабжения в специальных комплексах» в МЭИ. Профессор кафедры «Электрические и электронные аппараты» МЭИ.

Кустов Евгений Федорович окончил электромеханический факультет МЭИ в 1962 г. В 1990 г. защитил докторскую диссертацию «Редукционная симметрия кристаллов» в Институте кристаллографии РАН. Профессор кафедры «Физика и технология электротехнических материалов, компонентов и автоматических комплексов» МЭИ.