

* * *

Улучшение энергетических показателей линейного двигателя переменного тока

МАЛИНОВСКИЙ А.Е., САВАТЕЕВА И.С.

Наиболее известным способом компенсации продольного краевого эффекта линейного двигателя переменного тока является использование дополнительной короткозамкнутой обмотки, охватывающей магнитопровод индуктора [1]. Однако полной компенсации поля краевого эффекта достигнуть не удастся. Неполная пространственная компенсация приводит к дополнительным потерям во вторичном теле, снижает КПД и тяговое усилие машины. Кроме того, наличие короткозамкнутой обмотки, которая должна быть рассчитана на большие токи, усложняет конструкцию индуктора и приводит к дополнительным потерям энергии в двигателе, ухудшающим его тепловой режим. В статье рассматриваются способы компенсации продольного краевого эффекта в линейных асинхронных двигателях, которые позволяют обеспечить более полную пространственную компенсацию поля продольного краевого эффекта. Предлагаются функциональные схемы устройств компенсации, реализующих эти способы. Для компенсации поля продольного краевого эффекта предлагается использовать питание фазных обмоток линейных асинхронных двигателей несимметричной системой напряжений. Наряду с упрощением конструкции предлагаемые способы обеспечивают повышение КПД линейного двигателя и его коэффициента мощности.

Ключевые слова: линейный двигатель, продольный краевой эффект, компенсирующий виток, несимметричная система питающих напряжений, магнитный поток нулевой последовательности, устройство компенсации, КПД линейного двигателя

Наиболее известным способом компенсации продольного краевого эффекта (КЭ) линейного двигателя переменного тока является использование дополнительной короткозамкнутой обмотки, охватывающей магнитопровод индуктора. При этом поля нулевой последовательности, созданные продольным краевым эффектом, наводят в короткозамкнутом компенсирующем витке ЭДС, создающую встречно направленное поле [1]. Однако в

этом случае полной компенсации поля КЭ нельзя достигнуть по следующим причинам:

исходя из принципа компенсации поля вторичный поток всегда меньше потока, его породившего;

из-за фазового сдвига вторичного потока короткозамкнутой обмотки относительно поля КЭ, вызванного реактивным характером сопротивления компенсационного витка;

поле КЭ линейного двигателя создается распределенными фазными статорными обмотками, а компенсируется сосредоточенной короткозамкнутой обмоткой. Это приводит к пространственному распределению полей КЭ и компенсирующего, поэтому по длине индуктора существуют участки, где происходит полная компенсация поля КЭ, а также участки, на которых поле КЭ недокомпенсировано или перекомпенсировано.

Неполная пространственная компенсация поля КЭ приводит к дополнительным потерям во вторичном теле, снижает КПД и тяговое усилие машины. Кроме того, наличие короткозамкнутой обмотки, которая должна быть рассчитана на значительные токи, усложняет конструкцию индуктора и приводит к дополнительным потерям энергии в двигателе, ухудшающим его тепловой режим.

Представляется целесообразным поиск других способов компенсации поля КЭ и, в частности, использование для этой цели несимметричных режимов работы линейных асинхронных двигателей.

Одним из предлагаемых вариантов является создание компенсирующего поля за счет питания фазных статорных обмоток линейного двигателя

несимметричной системой напряжений с управлением по значению тока нулевой последовательности. При этом степень несимметрии задается такой, чтобы порожденное ею поле нулевой последовательности было противоположно направлено полю нулевой последовательности КЭ. Так как поле КЭ и компенсирующее поле создаются одними и теми же фазными обмотками, то их пространственное распределение одинаково, что приводит к более полной компенсации поля КЭ. Кроме того, степень несимметрии питающих напряжений можно выбрать такой, чтобы значение полей компенсационного поля и поля КЭ были равны.

Так как в процессе работы возможно изменение нагрузки двигателя, необходимо контролировать степень компенсации поля КЭ с помощью, например, электрических показателей, характеризующих значение поля нулевой последовательности двигателя. При соединении фазных статорных обмоток в звезду с нулевым проводом таким показателем является ток нулевой последовательности, измеряемый в проводе, соединяющем нулевую точку звезды с нулевым проводом питающей сети. При соединении фазных статорных обмоток в звезду без

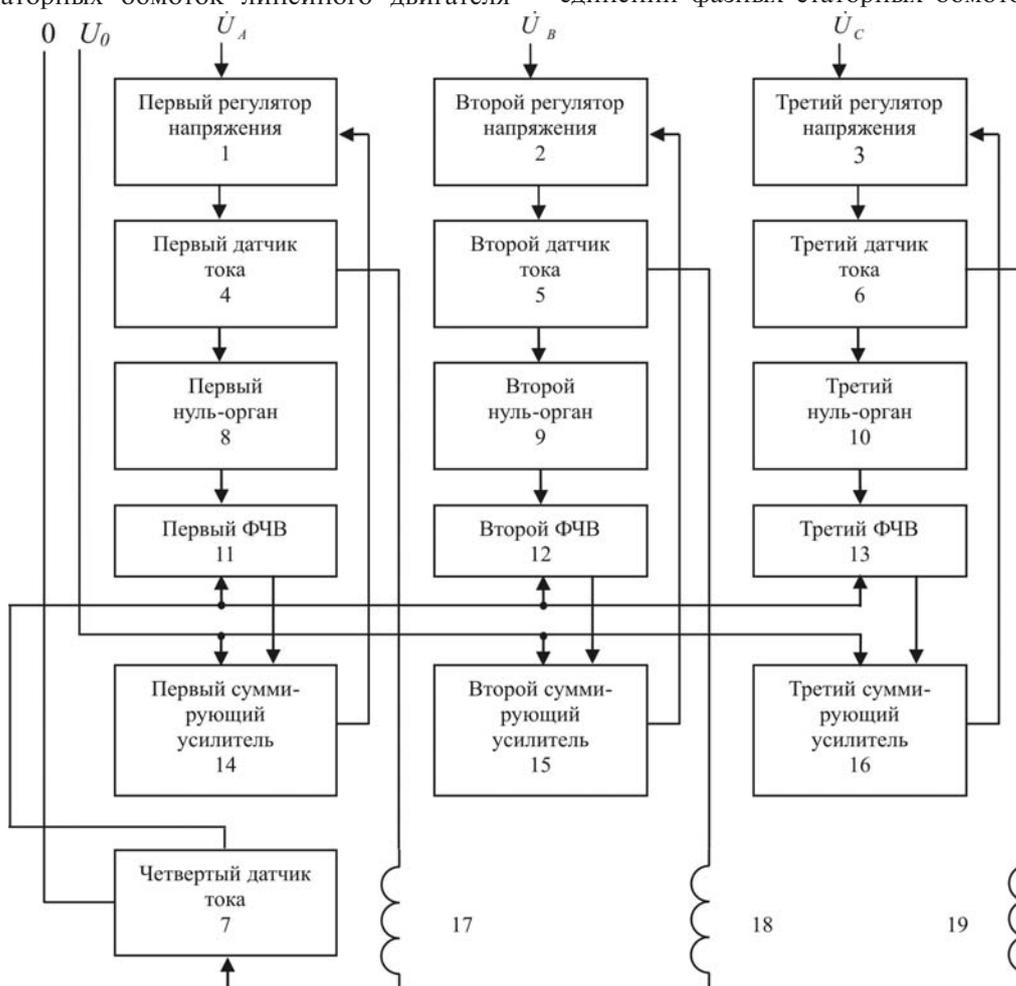


Рис. 1

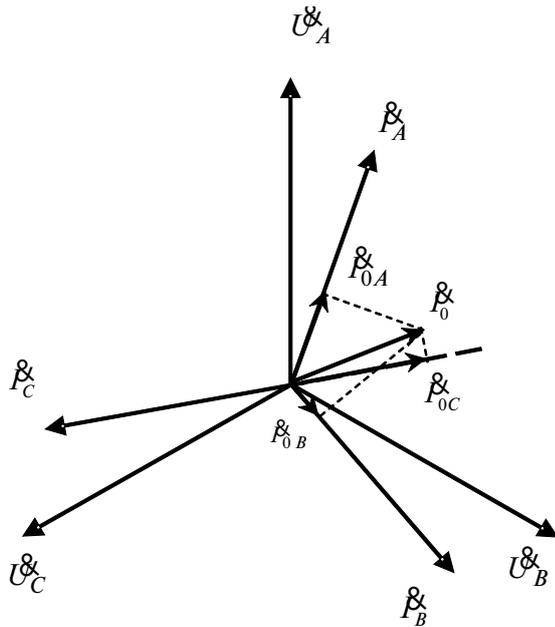


Рис. 2

нулевого провода показателем является напряжение нулевой последовательности, измеряемое между вышеуказанными точками. Режиму полной компенсации соответствуют нулевые значения этих показателей. Изменяя степень несимметрии питающих напряжений, добиваются нулевых значений показателей компенсации поля КЭ.

Технически реализацию предлагаемого способа можно осуществить в соответствии с функциональной схемой на рис. 1.

Устройство может быть двух- и более фазным. На схеме представлен трехфазный вариант выполнения индуктора. Линейный двигатель питается от трех регуляторов фазных напряжений 1–3. Фазные токи двигателя измеряются тремя датчиками тока 4–6, а ток нулевой последовательности — датчиком 7. Информационный выход датчика тока соединен со всеми информационными входами фазочувствительных выпрямителей. Другие входы суммирующих усилителей 14–16 соединены между собой и образуют вход управления напряжением. В качестве регуляторов напряжения могут использоваться полупроводниковые преобразователи напряжения, дроссели насыщения и пр.

Используется следующий принцип задания степени несимметрии напряжения, подводимого к статорным обмоткам. Результирующий ток нулевой последовательности I_0 (рис. 2), который измеряется датчиком тока 7, разлагается на три составляющие (проекции) по направлениям фазных токов I_A, I_B, I_C с помощью фазочувствительных выпрямителей 11–13. В результате разложения полу-

чаем три проекции тока I_{0A}, I_{0B}, I_{0C} . Задача компенсации поля КЭ считается решенной, если выполнено условие:

$$I_{0A} = I_{0B} = I_{0C} = 0.$$

С этой целью напряжение каждой из фаз изменяется в зависимости от значения и направления проекции вектора тока I_0 на ток этой фазы до тех пор, пока значение проекции не станет близким к нулю.

Схема работает следующим образом. На вторые входы суммирующих усилителей подается напряжение U_0 и через усилители поступает на входы управления регуляторов напряжения. В зависимости от значения напряжения U_0 задаются напряжения на фазных статорных обмотках 17–19. Изменяя значение U_0 , можно регулировать скорость движения вторичного тела линейного двигателя. С помощью датчиков тока снимается сигнал, пропорциональный току, который подается на нуль-органы 8–10. На выходе нуль-органов возникает прямоугольный, нормированный по амплитуде сигнал, фаза которого совпадает с фазой тока соответствующей фазной обмотки. Этот сигнал поступает на вход опорного напряжения соответствующего фазочувствительного выпрямителя. Возникновение поля КЭ приводит к появлению тока нулевой последовательности, который регистрируется датчиком тока 7. Сигнал, пропорциональный току нулевой последовательности, поступает на информационные входы всех фазочувствительных выпрямителей. На выходе выпрямителей возникают сигналы, пропорциональные сигналам на информационном входе, умноженные на косинус угла между информационным и опорным напряжениями, т.е. сигналы, пропорциональные I_{0A}, I_{0B}, I_{0C} . В каждой фазе они суммируются с напряжением U_0 с помощью суммирующих усилителей 14–16. Знак выходного напряжения фазочувствительных выпрямителей выбирается таким, чтобы при совпадении

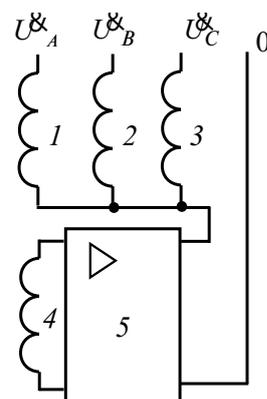


Рис. 3

проекции вектора тока I_0 с направлением фазного тока входные напряжения на суммирующих усилителях имели противоположные знаки, а при совпадении направлений – одинаковые. В результате на выходе суммирующих усилителей получим различные значения напряжения управления регуляторов напряжения, создающих такую несимметрию напряжений, при которой ток нулевой последовательности, а следовательно, и результирующее поле КЭ были равны нулю.

Предложенное устройство позволяет исключить из конструкции двигателя компенсационные обмотки и поднять КПД двигателя на 3–7% в зависимости от конструктивного исполнения.

В случаях, когда нет необходимости в регулировании скорости вторичного элемента линейного асинхронного двигателя изменением напряжения, эффективен способ компенсации полей КЭ с помощью отдельного источника напряжения нулевой последовательности. Способ реализуется с помощью устройства (рис. 3), содержащего индуктор линейного двигателя переменного тока, выполненный в виде магнитопровода с зубцовой зоной, в которой размещены фазные обмотки 1–3, включенные в звезду, а также измерительную обмотку 4, охватывающую по периметру активную зону индуктора, в которой наводится ЭДС, созданная результирующим магнитным полем двигателя. В этом случае обмотка выполнена разомкнутой, а в схему дополнительно введен усилитель напряжения 5, вход которого соединен с выводами обмотки, один вывод выхода соединен с нулевой точкой звезды фазных обмоток, второй – с нулевым проводом сети.

Компенсационное поле нулевой последовательности создается фазными обмотками статора за счет питания их от отдельного источника напряжения. Фаза и значение напряжения источника выбираются такими, чтобы созданное им поле было равно и противоположно направлено полю КЭ. Конструктивно наиболее просто напряжение нулевой последовательности вводить между нулевой точкой фазных статорных обмоток, включенных в звезду, и нулевым проводом питающей сети. О степени компенсации можно судить по значению напряжения на выводах обмотки, охватывающей индуктор двигателя. Если это напряжение равно нулю, то можно утверждать, что результирующий поток нулевой последовательности в индукторе равен нулю, т.е. поле КЭ компенсировано.

Покажем это. Значение пульсирующего магнитного потока, обусловленного КЭ, в ярме индуктора зависит от индукции в воздушном зазоре B_d , числа пар полюсов p и длины полюсного деления t [1]:

$$F_0 = (-1)^p \frac{t B_d}{p} \cos \omega t.$$

При несимметрии питающего напряжения линейного асинхронного двигателя в напряжении появляется нулевая составляющая u_0 . Под действием нулевой составляющей в магнитном поле индуктора создается магнитный поток нулевой последовательности, значение которого определяется выражением [2]:

$$u_0 = i_0 r_0 + \frac{dF_0}{dt}.$$

Амплитуду и фазу потока нулевой последовательности F_0 можно изменять с помощью u_0 . Считая F_0 компенсационным потоком F_K , задачу компенсации можно считать решенной, если выполняется условие [1]:

$$F_0 + F_K = 0.$$

Поскольку в зависимости от режима работы двигателя меняются амплитуда и фаза F_0 , то и компенсационный поток должен отслеживать эти изменения. Это осуществляется за счет создания напряжения нулевой последовательности усилителем, на вход которого подается сигнал, пропорциональный результирующему потоку нулевой последовательности. Сигнал получают с помощью обмотки, охватывающей индуктор. Так как ток по этой обмотке не протекает из-за значительного входного сопротивления усилителя 5, то диаметр ее провода выбирается из условий механической прочности.

Устройство работает следующим образом. Напряжение, введенное между нулевой точкой фазных обмоток и нулем питающей сети, приводит к появлению в фазных токах тока нулевой последовательности, который создает компенсационный поток

$$F_K = k_1 k_2 D U e^{-j}, \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент связи между потоком и током; k_2 – коэффициент усиления усилителя; $D U$ – входное напряжение усилителя; j – угол между введенным напряжением и созданным им током.

Напряжение усилителя определяется ЭДС, наведенной в обмотке 4, которая, в свою очередь, зависит от разности пульсирующих потоков

$$DF = F_0 - F_K; \quad (2)$$

$$D U = D E = E_0 - E_K = - \frac{dF_0}{dt} + \frac{dF_K}{dt}.$$

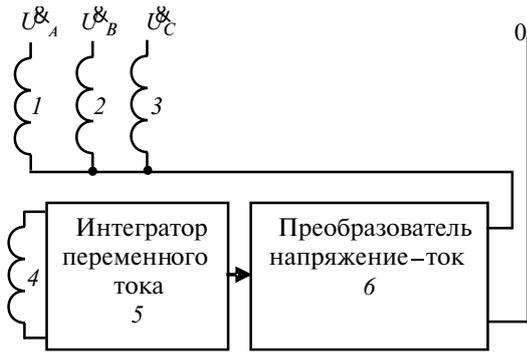


Рис. 4

Учитывая, что потоки синусоидальны во времени (так как в большинстве линейных двигателей из-за больших воздушных зазоров насыщение отсутствует), получаем

$$DU = j\omega_0(-F_0 - F_K) = \omega_0 DF e^{-j(p/2)},$$

где ω_0 – частота пульсирующего поля КЭ.

Подстановкой в (1) выразим компенсационный поток через результирующий:

$$F_K = \omega_0 k_1 k_2 DF e^{-j(p/2+j)}.$$

Подставив полученное выражение в (2), выразим результирующий поток через поток F_0 :

$$DF = \frac{F_0}{1 + \omega_0 k_1 k_2 e^{-j(p/2+j)}}.$$

Таким образом, способ компенсации позволяет уменьшить амплитуду пульсирующего поля КЭ независимо от режима работы двигателя. Степень компенсации определяется результирующим коэффициентом усиления $k = \omega_0 k_1 k_2$, при большом значении которого DF стремится к нулю.

Экспериментальная проверка показала, что по сравнению с компенсацией поля КЭ с помощью короткозамкнутой обмотки данный способ позволяет повысить КПД двигателя на 5%. Однако расчеты выявили, что из-за фазовых сдвигов компенсирующего напряжения, обусловленных конечными параметрами линейного двигателя, компенсационный поток сдвинут по фазе относительно компенсируемого поля на угол $p/2 + j$, что ограничивает степень компенсации поля КЭ.

Это заставило несколько изменить схему устройства компенсации, введя в нее интегратор переменного тока и преобразователь «напряжение – ток», включенные последовательно (рис. 4). Интегратор 5 корректирует фазовый сдвиг ЭДС, наве-

денной в измерительной обмотке, а преобразователь 6 обеспечивает создание компенсирующего потока. Особенностью данного способа по сравнению с предыдущим является использование управляемого источника тока, включенного по аналогии источником напряжения.

В этом случае выходной ток преобразователя «напряжение–ток», введенного между нулевой точкой фазных обмоток и нулем питающей сети, способствует появлению в фазных токах составляющей нулевой последовательности, создающей компенсационный поток

$$F_K = k_1 DU,$$

где k_1 – параметр, учитывающий коэффициент усиления преобразователя и конструктивные показатели фазных обмоток 1–3; DU – входное напряжение преобразователя «напряжение–ток».

Значение ЭДС, наводимой в измерительной обмотке 4 магнитными потоками F_0 и F_K , интегрируется интегратором и подается на вход преобразователя. В результате компенсирующий поток имеет значение

$$F_K = \frac{k_1}{T} \int (E_0 - E_K) dt = \frac{k_1}{T} \int \frac{dF_0}{dt} + \frac{dF_K}{dt} dt = \frac{k_1}{T} (-F_0 + F_K) = -\frac{k_1}{T} DF,$$

где T – постоянная времени интегрирования интегратора.

Учитывая, что сигнал, проходя по цепочке «интегратор – преобразователь» инвертируется, получаем следующее значение результирующего магнитного потока поля КЭ:

$$DF = F_0 - F_K = F_0 - \frac{k_1}{T} DF$$

или

$$DF = \frac{F_0}{\frac{k_1}{T} + 1},$$

т.е. поле КЭ уменьшается в этом случае в $(k_1 / T) + 1$ раз. При этом компенсирующий поток и поток КЭ противофазны, что увеличивает степень компенсации поля КЭ и повышает КПД линейного двигателя.

Таким образом, возможны два пути компенсации пульсирующих полей КЭ за счет использования несимметричных режимов работы линейного двигателя:

создание несимметрии при питании двигателя от несимметричной системы напряжений;

создание несимметрии при питании двигателя от симметричной системы фазных напряжений и отдельного источника нулевой последовательности.

Предложенные способы позволяют компенсировать поля КЭ независимо от режима работы двигателя, а также могут быть использованы при необходимости одновременно с компенсацией полей КЭ регулировать скорость движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вольдек А.И.** Индукционные магнетогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970, 271 с.

2. **Трещев И.И.** Электромеханические процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980, 344 с.

[27.02.14]

Авторы: Малиновский Александр Евгеньевич окончил электромеханический факультет Смоленского филиала Московского энергетического института (МЭИ) в 1973 г. В 1997 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук «Линейные асинхронные двигатели с улуч-

Improving the Power Performance Indicators of a Linear AC Motor

A.E. MALINOVSKII and I.S. SAVATEEVA

The best known method for compensating the longitudinal edge effect in a linear AC motor is to use an additional short-circuited winding embracing the magnetic core [1]. However, this measure does not allow the edge effect field to be compensated to a full extent. Incomplete spatial compensation results in additional losses in the secondary body, in lower efficiency, and in smaller traction force developed by the machine. In addition, the presence of a short-circuited winding, which must be designed for high currents, complicates the inductor design. The presence of a short-circuited winding, which must be designed for high currents, complicates the inductor design and gives rise to additional loss of energy in the motor, which has an adverse effect on its temperature operating conditions. Methods of compensating the longitudinal edge effect in linear induction motors are considered, using which the field caused by the longitudinal edge effect is spatially compensated to a fuller extent. The functional diagrams of compensating devices implementing these methods are proposed. For compensating the field caused by the longitudinal edge effect it is proposed to organize power supply to the phase windings of linear induction motors by an unbalanced system of voltages. Along with obtaining a simpler design, the use of the proposed methods makes it possible to achieve better efficiency of the linear motor and a higher value of its power factor.

Key words: *linear motor, longitudinal edge effect, compensating turn, unbalanced system of power supply voltages, zero-sequence magnetic flux, compensating device, linear motor efficiency.*

REFERENCES

1. **Vol'dek A.I.** *Induktsionnye magnitogidrodinamicheskiye mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom* (Induction Magnetohydrodynamic Machines with a Liquid-Metal Working Fluid). Leningrad. Publ. «Energiya», 1970, 271 p.

2. **Treshchev I.I.** *Elektromekhanicheskiye protsessy v mashinakh peremennogo toka* (Electromechanical Processes in AC Machines). Leningrad. Publ. «Energiya», 344 p.

Author: Malinovskii Aleksandr Evgen'yevich (Smolensk, Russia) – Doctor Techn. Sci. He is Professor at the Smolensk Branch of the Moscow Power Engineering Institute (MPEI).

Savateyeva Irina Sergeevna (Smolensk, Russia) Cand. Techn. Sci. She is Associate Professor at the Smolensk Branch of the MPEI.



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

В Филиале ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» – СибНИИЭ успешно испытаны макетные образцы кабельной арматуры 110, 220 и 330 кВ

Сотрудниками Филиала ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» - СибНИИЭ, ЗАО «ФЕНИКС-88» и ОАО «ВНИИКП» — ведется разработка концевых и соединительных муфт для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на классы напряжения 110, 220 и 330 кВ, выполняемая в рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) по заказу ОАО «ФСК ЕЭС». Создание кабельной арматуры для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 330 кВ в России выполняется впервые.

Актуальность работы обусловлена сложившейся ситуацией на российском рынке кабельной продукции: в последние годы многими отечественными заводами освоено производство качественного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на высокие классы напряжения. Ситуация с отечественной кабельной арматурой противоположная, поэтому кабельные заводы при поставках своей продукции вынуждены закупать зарубежную кабельную арматуру, что неуклонно приводит к росту стоимости и сроков строительства электросетевых объектов. Успешное выполнение работы позволяет снизить зависимость от импортной продукции и повысить конкурентоспособность отечественных кабельных заводов за счет сокращения сроков поставки кабельных системы и снижения их общей стоимости.

Выполнение НИОКР подразумевает четкую стадийность, которая позволяет оценивать качество выполнения работы на ряде этапов и вносить необходимые корректировки. В рамках выполнения текущего этапа работы созданы и изготовлены макетные образцы концевых и соединительных муфт, позволившие проверить основные технические решения, касающиеся выполнения основной функции кабельной арматуры — регулирования электрического поля.

Испытуемые системы состояли из двух макетных образцов концевых муфт и одного макетного образца соединительной муфты и были смонтированы на каждый класс напряжения — 110, 220 и 330 кВ. Предварительные испытания макетных образцов выполнены в Филиале ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» – СибНИИЭ – в соответствии с разработанной программой и включали испытания переменным напряжением промышленной частоты, напряжением грозовых импульсов, а также измерение уровня частичных разрядов. Испытания в полном объеме прошли успешно, что явилось отправной точкой для перехода к следующей стадии выполнения работы.

*Лебедев Иван Александрович,
начальник Отдела новых технологий
(e-mail: i.a.lebedev@ntcsib.ru)*

шенными энергетическими показателями» в МЭИ. Профессор кафедры «Электромеханические системы» Смоленского филиала МЭИ.

Саватеева Ирина Сергеевна окончила электромеханический факультет Смоленского филиала МЭИ в 1976 г. В 1986 г. защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка многодвигательных электроприводов кабельных агрегатов с электрическим согласованием скоростей» в МЭИ. Доцент кафедры «Электромеханические системы» Смоленского филиала МЭИ.