

ISSN 0013-5380

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1995

11

Адреса редакции: 103012 Москва, К-12, Б.Черкасский пер., 2/10  
924-24-80  
101000 Москва, Главный почтамт, абонентский ящик № 648

Художественный редактор Т.А.Дворецкова

Сдано в набор 11.09.95. Подписано в печать 28.09.95. Формат 60×881/8.  
Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,8. Тираж 870 экз. Заказ 4514  
Энергоатомиздат, 113114 Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10  
Макет выполнен АО «Знак», 103012 Москва, Б.Черкасский пер., 2/10  
Типография № 9 Комитета РФ по печати  
109033 Москва, Волочаевская ул., 40

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

11  
НОЯБРЬ  
1995

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛИ: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК (Отделение физико-технических проблем энергетики),  
ФЕДЕРАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЩЕСТВ

## СОДЕРЖАНИЕ

Борисов Ю.В., Гуревич Ю.Е., Пойдо А.И., Хвощинская З.Г. О применении газотурбинных генераторов в энергосистемах России . . . . .	2
Войтович Р.А., Кадомская К.П. Влияние конструктивных параметров кабельных линий высокого напряжения на их эксплуатационные характеристики . . . . .	8
Козлов В.А. О надежности электроснабжения потребителей в рыночных условиях . . . . .	15
Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В., Аванесов М.А., Хуан Море Оучи. Электромагнитные силы, действующие на элементы магнитного сердечника и провода с токами в области паза электрической машины . . . . .	19
Скубов Д.Ю., Ходжаев К.Ш. Уравнения нестационарных процессов в трехфазных индукторных генераторах	29
Макаров Л.Н., Ахунов Т.А., Попов В.И. Создание новой российской серии асинхронных машин . . . . .	36
Тесленко О.А., Ширинский С.В. К расчету параметров схемы замещения магнитной цепи ярем статора и ротора неявнополюсной синхронной машины . . . . .	39
Клепиков В.Б., Гуль А.И. Многомерная оптимизация параметров двукратно интегрирующих цифроаналоговых систем электропривода . . . . .	42
Хайруллин И.Х., Янгиров И.Ф., Исмагилов Ф.Р. Вибрационный электромеханический преобразователь со спиральным вторичным элементом . . . . .	47
Филаретов В.В. Топологические формулы для преобразования полного электрического многоугольника в эквивалентную звезду . . . . .	50
Чаплыгин Е.Е. Вопросы управления вентильными компенсаторами пассивной мгновенной мощности . . . . .	56
Амелин С.А., Новиков А.А., Стров К.Н., Стров Н.Н. Модификация модели Джилса-Атертона для учета частотных свойств ферромагнетиков . . . . .	60
<b>ДИСКУССИИ</b>	
Шаталов А.С. О неизвестных опытах по электромагнитной индукции . . . . .	64
<b>ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ</b>	
Шнейберг Я.А. Выдающийся электротехник и пропагандист электротехнических знаний (К 150-летию со дня рождения Владимира Николаевича Чиколова)	67
Лежнева О.А. Гальвани и Вольта: противостояние и общее свершение . . . . .	72
Скундин А.М. Проблема Вольты в электрохимии	76
Нетушил А.В. Вольта, вольт и вольт-амперные характеристики элементов электрических цепей . . . . .	77
<b>ХРОНИКА</b>	
Беспалов В.Я. В Академии электротехнических наук	78
Николай Иосифович Зеленохат (К 60-летию со дня рождения)	80

## CONTENTS

Borisov Yu.V., Gurevich Yu.E., Poido A.I., Khvoshchinskaya Z.G. On Use of Gas-Turbine Generators in Power Systems of Russia . . . . .	2
Voitovich R.A., Kadomskaya K.P. Influence of Design Parameters of High-Voltage Power Transmission Cable Lines on their Service . . . . .	8
Kozlov V.A. Power Supply Reliability under Market Conditions . . . . .	15
Ivanov-Smolenskii A.V., Abramkin Yu.V., Avanesov M.A., Juan More Ouchi. Electromagnetic Forces Acting on Magnetic Core Elements and Current Carrying Conductors in the Slot Area of Electrical Machine	19
Skoubov D.Yu., Khodjayev K.Sh. Equations for Transient Electromechanical Processes in Three-Phase Inductor Generators . . . . .	29
Makarov L.N., Akhounov T.A., Popov V.I. Creation of a New Russia's Series of Asynchronous Machines . . . . .	36
Teslenko O.A., Shirinskii S.V. Method for Calculating the Parameters of a Equivalent Circuit for Stator and Rotor Yoke Magnetic Circuit Non-Salient Pole Synchronous Machine . . . . .	39
Klepikov V.B., Gul' A.I. Multimeasure Optimization of Double-Integrating Digital-Analogue Electric Drive System Parameters . . . . .	42
Khairullin I.Kh., Yanguirov I.F., Ismaguilov F.R. Vibrational Electromechanical Converter with a Spiral Secondary Element . . . . .	47
Filaretov V.V. Topological Formulae for Transfiguration of Complete Electrical Polygon into an Equivalent Star	50
Chaplyguin Ye.Ye. Questions of Control of Valve Compensator of Passive Instantaneous Power . . . . .	56
Amelin S.A., Novikov A.A., Stroyev K.N., Stroyev N.N. Modification of Jiles's and Atherton's Model for Taking Account of Frequency Properties of Magnetic Materials	60
<b>DISCUSSIONS</b>	
Shatalov A.S. About Unknown Experiments on Electromagnetic Induction . . . . .	64
<b>FROM the HISTORY of ELECTRICAL ENGINEERING</b>	
Shneiberg Ya.A. Prominent Electrician and Propagandist of Electrotechnical Knowledge (to Mark the 150-th Anniversary of V.N. Chikolev)	67
Lezhneva O.A. Galvani and Volta: Opposition and Joint Accomplishments . . . . .	72
Skundin A.M. Volta's Problems in Electrochemistry . . . . .	76
Netushil A.V. Volta, Volt and Volt-Ampere Characteristics of Electric Circuit Elements . . . . .	77
<b>CHRONICLE</b>	
Bespalov V.Ya. In the Academy of Electrical Engineering Sciences . . . . .	78
Nikolai Iosifovich Zelenokhat (to Mark the 60-th Anniversary)	80

# О применении газотурбинных генераторов в энергосистемах России

БОРИСОВ Ю.В., ГУРЕВИЧ Ю.Е., ПОЙДО А.И., ХВОЩИНСКАЯ З.Г.

Приведен обзор особенностей режимов и устойчивости газотурбинных генераторов, отличающихся их от привычных условий работы паротурбинных и гидротурбинных генераторов в больших энергосистемах и вынуждающих в каждой конкретной ситуации принимать специальные решения для обеспечения устойчивости генераторов и надежного электроснабжения потребителей. Рассматриваются электростанции с газотурбинными генераторами малой и средней мощности (12—36 МВт).

**Ключевые слова:** энергосистемы, режим, газотурбинные генераторы, устойчивость, надежность электроснабжения, обзор

Газотурбинные установки (ГТУ) в течение последних десятилетий заняли прочное место в энергетике зарубежных стран и начинают широко применяться в России. Большая их часть предназначена для выработки электроэнергии и тепла или работы в составе парогазовых блоков [1].

За рубежом ГТУ в составе газотурбинных электростанций (ГТЭС) работают в основном в осетропиковом или резервном режимах. Длительный режим работы ГТЭС характерен только для развивающихся районов, имеющих природный газ или жидкое топливо. Единичная мощность агрегатов на таких станциях, например в США, равна 25 МВт.

В энергосистемах России получают широкое распространение ГТЭС с агрегатами сравнительно небольшой мощности, в основном 12 МВт, созданные на базе судовой газотурбинной установки (двигателя). Такие станции расположены в северных районах нашей страны (Ямбург, Уренгой, Ямал, п. Мирный и др.). Всего имеется 17 электростанций с суммарной мощностью ГТУ примерно 1800 МВт.

К 1995—1996 гг. предполагается ввести ГТЭС суммарной мощностью 3000 МВт не только в северных районах страны, но и на Северном Кавказе, Урале и центре европейской части России. Основной причиной такого широкого применения газотурбинных установок за рубежом и в России являются их преимущества по сравнению с паротурбинными: небольшие капиталовложения, небольшие сроки сооружения, простота эксплуатации, более высокий коэффициент полезного действия.

Однако, если в зарубежных странах ГТЭС расположены преимущественно в концентрированных энергосистемах и имеют «жесткие» связи с ними, то в различных регионах России условия работы

*The paper presents a review of features of operating conditions and stability of gas-turbine generators, which differ them from turbogenerators and hydrogenerators used in large power systems. These features compel to find in every occurrence special solutions for ensuring stability of generators and reliability of power supply to consumers. Power stations with gas-generators of 12—36 MW are considered.*

**Key words:** electrical power systems, conditions, gas-turbine generators, stability, reliability of power supply, review

ГТУ существенно отличаются.

На Северном Кавказе, на Урале и в Западной Сибири началось внедрение агрегатов мощностью 16—25 МВт на базе ГТУ типа ДЖ-59-ЛЭ с утилизацией тепла выхлопных газов в котлах-утилизаторах. Широкое применение ГТУ этой серии предполагается осуществлять как в порядке реконструкции и расширения действующих ТЭЦ и ГРЭС, так и путем строительства новых электростанций.

Доля всех ГТЭС, предполагаемых для установки в энергосистемах России, останется сравнительно небольшой (единицы процентов), поэтому переходные процессы в энергосистемах, как едином целом, значительно не изменятся. Но в отдельных узлах энергосистем роль ГТЭС значительно выше. В северных районах нашей страны проектируемые ГТЭС будут работать либо автономно (без связей с энергосистемой), например Ямальские ГТЭС, либо в автономных энергосистемах со «слабыми» связями 110—220 кВ (например в Чаушском районе), либо параллельно с Единой энергосистемой России по протяженным линиям 110 кВ (например Ямбургская и Уренгойская ГТЭС). Во всех этих случаях, как показано далее, можно ожидать трудностей при обеспечении устойчивости генераторов. Нужно учесть также, что в неблагоприятных климатических условиях этих регионов повреждаемость длинных линий 110 кВ очень высока, и поэтому даже при наличии связей с энергосистемой ГТЭС могут вынужденно работать длительное время автономно: в послеаварийных режимах и после работы делительной автоматики или автоматики ликвидации асинхронного режима.

Ряд ГТЭС проектируется для электроснабжения непосредственно крупных предприятий с непрерывными технологическими процессами. В не-

оторых случаях даже при условии расположения ГТЭС в концентрированной энергосистеме, планируется (по крайней мере на первых этапах) не присоединять станции к энергосистеме (ГТЭС в Коломне, на Таманском полуострове).

Применение ГТУ в энергетике России в значительной степени сдерживалось отставанием нашей промышленности в газотурбостроении. Однако имеется значительный научно-технический задел создания высокотемпературных ГТУ, накоплен опыт эксплуатации стационарных установок этого типа на магистральных газоперекачивающих станциях.

Начавшаяся конверсия военного производства позволяет использовать опыт разработки и эксплуатации газотурбинных двигателей авиационной и судостроительной промышленности. На этой базе в настоящее время разрабатываются стационарные ГТУ для энергетики. На базе судовых и авиационных двигателей серийно выпускаются ГТУ единичной мощностью 16 МВт; ДЖ-59-ЛЗ (ПО «Заря», г. Николаев), НК-16ст (КМПО), разрабатываются газотурбинные установки единичной мощностью до 25–30 МВт, что соответствует мировому опыту. (Здесь единичные мощности указаны при температуре окружающей среды +15°C. При более низких температурах возможно увеличение мощности.)

Параметры рассматриваемых ГТЭС малой и средней мощности по ряду существенных показателей отличаются от параметров привычного оборудования тепловых электростанций. Из факторов, определяющих устойчивость газотурбинных генераторов (ГТГ), наиболее существенны два обстоятельства.

Во-первых, ГТУ, выпускаемые и разрабатываемые на такие мощности, выполняются трехвальными со свободной силовой турбиной; компрессоры имеют отдельные приводы. Поскольку газовая турбина имеет значительно меньший момент инерции по сравнению с паровой, то механические постоянные инерции генератора с его турбиной оказываются меньшими, чем у турбогенераторов средней мощности, примерно в 1,5–2 раза. Следовательно, для нарушения устойчивости достаточно меньшего возмущения. Сказанное не относится к ГТУ большой единичной мощности, так как они выполняются, как правило, одновальными. Наличие компрессора на одном валу с генератором значительно увеличивает момент инерции, причем в зависимости от конструкции вращающихся частей турбокомпрессорного агрегата постоянные инерции могут быть существенно различными.

Во-вторых, статические системы возбуждения газотурбинных генераторов (ГТГ) выпускаются без последовательных трансформаторов, которые

используются при питании системы возбуждения от шин электростанции для того, чтобы обеспечить это питание во время глубоких снижений напряжения при близких КЗ. При отсутствии последовательных трансформаторов в таких системах возбуждения близкое КЗ вызывает не форсировку, а расфорсировку возбуждения.

Таким образом, особенности режимов и устойчивости ГТГ обусловливаются как широким диапазоном условий их работы в энергосистеме (от «жесткой» связи с ней до автономной работы на местную нагрузку), так и конструктивными особенностями ГТУ, из-за которых ГТГ имеют неблагоприятные динамические параметры.

Приведенные далее количественные характеристики устойчивости ГТГ получены в расчетах, выполнявшихся для различных проектных вариантов привязок ряда ГТЭС к энергосистеме (Северный Кавказ и др.) и для случаев постоянной или временной работы ГТЭС вне энергосистемы. Расчеты выполнялись по программе «Мустанг» с использованием известных методов анализа устойчивости энергосистем [2]. Характерная особенность расчетов устойчивости ГТГ — резкая зависимость их результатов от выбранных расчетных условий. Изменения установленной мощности ГТЭС, места ее расположения относительно других электростанций и узлов нагрузки, пропускной способности связей ГТЭС с энергосистемой могут значительно изменить оценки динамической устойчивости ГТГ. Поэтому приведенные результаты расчетов следует рассматривать только как примеры, показывающие, что задача обеспечения надежного электроснабжения от ГТЭС существует, достаточно сложна и многогранна.

Если небольшая электростанция вводится в работу в уже сложившейся концентрированной энергосистеме, с крупными электростанциями и большими узлами нагрузки, то пропускная способность связей новой электростанции с остальной энергосистемой обычно оказывается вполне достаточной. При таких «жестких» связях электростанции с энергосистемой ее генераторы обладают значительными запасами устойчивости. Основные проблемы обеспечения устойчивости энергосистемы приходится решать применительно к крупным электростанциям и сетям высших классов напряжения, а малые электростанции соответственно мало влияют на устойчивость. Однако, когда имеются в виду ГТГ малой и средней мощности, все же нужно ожидать снижения запасов устойчивости из-за неблагоприятных динамических параметров.

В какой мере существенны эти изменения для устойчивости ГТГ, определяется тем, насколько сильно введение в эксплуатацию ГТЭС из-

меняет потокораспределение в энергосистеме. Имеется четыре качественно различных случая:

1) при введении ГТЭС в эксплуатацию соответствующая мощность на ближайшей электростанции выводится из эксплуатации (например, по причине физического износа);

2) мощность вводимой в эксплуатацию ГТЭС расходуется на покрытие роста нагрузки в том же районе, т.е. в непосредственной близости от ГТЭС; при этом потокораспределение вне этого района (безотносительно к тому, является ли он дефицитным или избыточным) не изменяется;

3) мощность вводимой в эксплуатацию ГТЭС расходуется на покрытие нагрузок в других районах энергосистемы, причем район, где вводится в эксплуатацию ГТЭС, был дефицитным;

4) то же, что в п. 3, но район, где вводится в эксплуатацию ГТЭС, не был дефицитным.

В первом случае имеет место некоторое снижение динамической устойчивости энергосистемы только из-за менее благоприятных динамических параметров ГТГ. Предельные по устойчивости длительности КЗ вблизи шин высокого напряжения ГТЭС уменьшаются на 5–10%; такие изменения мало существенны.

Случай второй почти равнозначен предыдущему, но возможны небольшие отличия, обусловленные особенностями переходных процессов в нагрузке.

В третьем случае введение в эксплуатацию ГТЭС вызовет уменьшение потоков мощности, направленных в данный район, что создаст тенденцию к увеличению устойчивости.

В четвертом случае может иметь место значительное снижение устойчивости энергосистемы, обусловленное не только неблагоприятными динамическими параметрами ГТГ, но и ростом потоков мощности (из данного района в соседние). Изменения запасов устойчивости зависят от пропускной способности сети в этом районе. Для одной из ситуаций, встретившихся при проектных проработках размещения ГТЭС на Северном Кавказе, получены снижения предельных по динамической устойчивости длительностей КЗ, приведенные в таблице для двух вариантов схемы: в I варианте ГТЭС примыкает к шинам наиболее крупной потребительской подстанции, во II варианте — к шинам крупной ГРЭС;  $P_*$  — отношение суммарной мощности газотурбинных генераторов ГТЭС к суммарной мощности турбогенераторов ближайшей крупной ГРЭС.

Вариант II хуже, чем I, потому что приближение шин ГТЭС к потребителю благоприятно оказывается на устойчивости двигателей.

Чем слабее (из-за неразвитости сетей энергосистемы) связь ГТЭС с энергосистемой, тем больше трудности обеспечения динамической ус-

Вариант схемы	Ближайший к месту КЗ узел	Вид КЗ	Снижения $t_{\text{к.з. пред.}}$ %		
			$P_* = 0,2$	$P_* = 0,5$	$P_* = 1$
I	Шины ГРЭС	Трехфазное	2	4	8
I	Шины ГТЭС	Трехфазное	9	19	28
I	То же	Двухфазное на землю	12	25	37
II	То же	Трехфазное	23	38	49
II	То же	Двухфазное на землю	25	42	54

тойчивости ГТГ. Прежде всего, по мере ослабления связи ГТЭС с энергосистемой резко сокращается та длительность КЗ, при которой не нарушается устойчивость ГТГ (рис. 1,а). Предельные по устойчивости длительности трехфазных КЗ на линиях, отходящих к электроприемникам от шин генераторного напряжения ГТЭС, даны на рис. 1,а в функции величины, непосредственно характеризующей «жесткость» связи ГТЭС с энергосистемой и равной отношению составляющей тока КЗ от энергосистемы к составляющей тока КЗ от ГТГ (для КЗ на шинах генераторного напряжения). Во всех расчетных вариантах коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности, передаваемой в энергосистему, не меньше 20%.

Кривые 1 и 2 были получены для промышленной нагрузки, питающейся с шин генераторного напряжения ГТЭС и весьма благоприятной

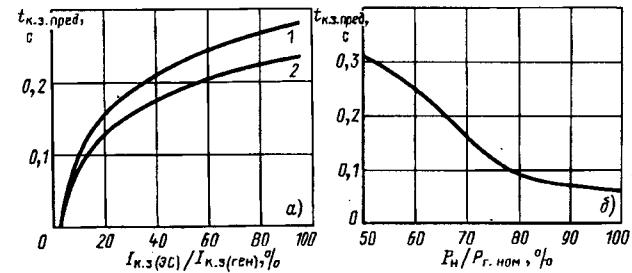


Рис. 1. Пример зависимости предельной по устойчивости ГТГ длительности КЗ на стороне 10 кВ от «жесткости» связи ГТЭС с энергосистемой (а) и от значения загрузки ГТГ при работе без связи с энергосистемой (б):  
1 — независимое возбуждение или самовозбуждение с последовательными трансформаторами; 2 — самовозбуждение без последовательных трансформаторов

в отношении динамической устойчивости: нагрузка не превышает 50 % номинальной мощности ГТЭС и содержит асинхронные двигатели 380 В в основном небольшой мощности; кроме того, учтено, что при КЗ часть нагрузки (здесь — 30%) самопроизвольно отключается из-за отпадания контактов магнитных пускателей.

Реальная длительность указанных КЗ при обычных устройствах релейной защиты и обычных выключателях составляет ориентировочно

0,15–0,2 с. Поэтому из рис. 1,а следует, что устойчивость при «слабых» связях без специальных противоаварийных мер может не обеспечиваться.

Отметим, что автономную работу ГТЭС нельзя рассматривать (в отношении динамической устойчивости ГТГ) как предельный случай ослабления связи ГТЭС с энергосистемой. Это связано с тем, что при параллельной работе ГТЭС с энергосистемой должна сохраняться устойчивость как ГТГ относительно генераторов энергосистемы, так и взаимная устойчивость ГТГ и нагрузки (двигателей). При автономной работе режим после КЗ может осуществляться при частоте, отличающейся от частоты сети, т.е. должна решаться только вторая задача устойчивости. Но, с другой стороны, при отсутствии связи с энергосистемой теряется и подпитка реактивной мощностью, особенно необходимая во время самозапуска двигателей при ГТГ, не имеющих в системе возбуждения последовательных трансформаторов. Поэтому режимы автономной работы ГТЭС должны рассматриваться отдельно и требуют особого внимания.

При автономной работе ГТЭС динамическая устойчивость решающим образом зависит от значения и состава нагрузки. На рис. 1,б показаны предельные длительности тех же КЗ в зависимости от отношения значений потребляемой мощности к номинальной мощности работающих ГТГ; генераторы с системой возбуждения без последовательных трансформаторов; нагрузка такая же, как и в предыдущем примере, но самоотключения отсутствуют. По этой зависимости видно, что возможности работы ГТЭС с нагрузкой, составляющей 70–100% мощности работающих ГТГ, весьма проблематичны.

Наличие синхронных двигателей может и

улучшить динамическую устойчивость автономно работающей ГТЭС, и ухудшить ее — в зависимости от моментов инерции СД, их систем возбуждения и пр. На рис. 2 показаны переходные процессы, вызванные тем же КЗ, при нагрузке, составляющей 50% мощности генераторов и состоящей на 60% из синхронных двигателей. На рис. 2,а и б различны только значения моментов инерции СД: во втором случае они почти в 5 раз меньше. В последнем случае при аварийных возмущениях нарушается устойчивость всех машин; такой процесс заканчивается отключением синхронных и асинхронных двигателей и, возможно, отключением ГТГ из-за сброса нагрузки.

Работа ГТЭС, слабо связанный с энергосистемой, предъявляет еще одну группу требований, поскольку нужно считаться с высокой вероятностью внезапного отделения ГТЭС (с местной нагрузкой) от энергосистемы в результате аварийного разрыва связей или действия делительной автоматики, предназначенной для сохранения электроснабжения собственного потребителя ГТЭС в случае аварии в энергосистеме. Чтобы внезапное отделение ГТЭС от энергосистемы не вызвало нарушения устойчивости ГТГ и двигателей, соотношение между генерацией мощности ГТЭС и значением ее местной нагрузки должно перед делением находиться в допустимой зоне, качественно показанной на рис. 3.

Вероятность внезапного отключения связи ГТЭС с энергосистемой зависит от числа линий, их протяженности и удельной повреждаемости линий. При этом нужно учитывать, что при низких запасах динамической устойчивости успешные АПВ не позволяют сохранить параллельную работу, так как за время АПВ устойчивость ГТГ успевает нарушаться, а ресинхронизация при слабых связях мало вероятна. Поэтому на «слабых»

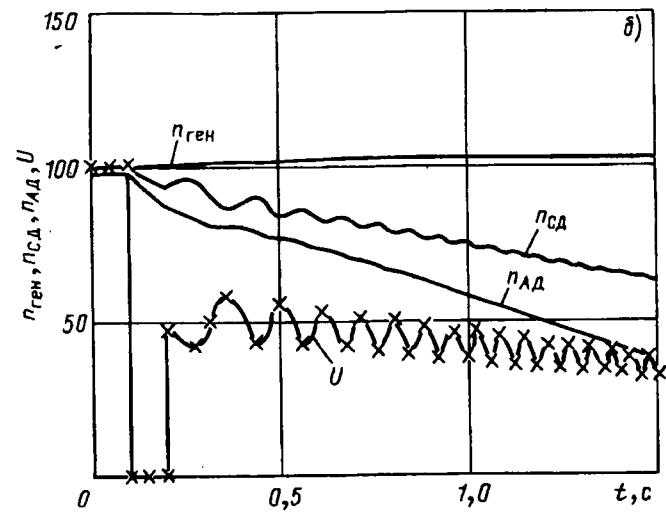
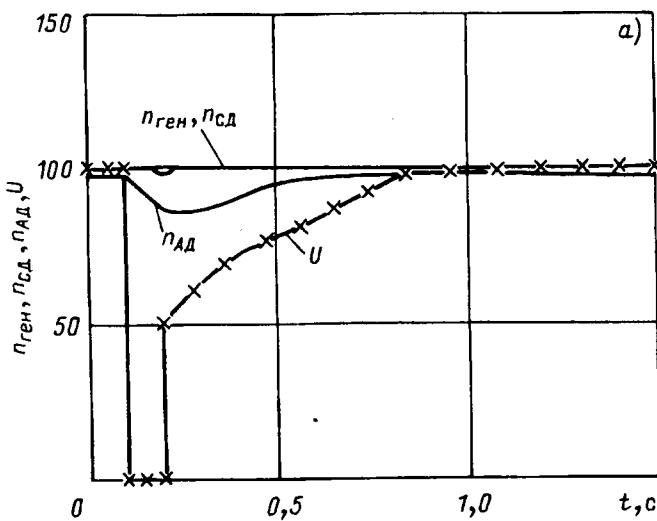


Рис. 2. Переходные процессы, вызванные КЗ: изменения скоростей вращения ГТГ, СД и АД (в процентах от значений синхронной скорости вращения) и напряжения на шинах ГТГ (в процентах к номинальному): а — СД — привод центробежных компрессоров; б — привод насосов

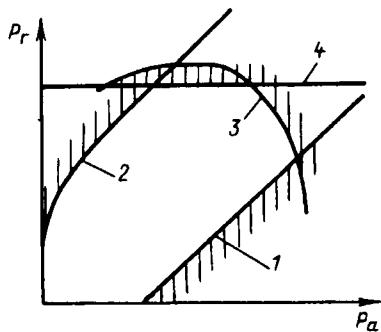


Рис.3. Область допустимых режимов работы ГТГ в случаях, когда внезапное отключение ГТЭС с местной нагрузкой от энергосистемы не должно приводить к нарушению электроснабжения этой нагрузки: 1 — ограничение по допустимым снижениям частоты в переходном процессе после отделения от энергосистемы; 2 и 3 — ограничения по допустимому повышению частоты (т. е. не приводящему к отключению ГТГ автоматами безопасности) при отделении от энергосистемы без КЗ и с КЗ соответственно; 4 — ограничение по располагаемой мощности ГТГ

связях, снабженных только ТАПВ (без ОАПВ), к отделению ГТЭС от энергосистемы может приводить каждое КЗ, число которых значительно. Так, в некоторых промышленных районах центра России на ВЛ 110 кВ происходит в среднем до 20 КЗ (большей частью однофазных) на 100 км линии в год.

В случаях «слабой» связи ГТЭС с энергосистемой и автономной работы ГТЭС необходимо рассматривать также условия пусков наиболее крупных двигателей как в нормальных, так и вероятных ремонтных режимах. Проверяется снижение напряжения в начале пуска и, в необходимых случаях, продолжительность пуска. Необходимость обеспечения пусков двигателей налагает существенные ограничения на значение суммарной нагрузки, питаемой от ГТЭС.

При выборе схемы выдачи мощности ГТЭС своим потребителям и в энергосистему нужно убедиться в том, что ни в каком из длительных режимов напряжения на секциях шин РП и КТП потребителя не окажутся несинхронными. Такой опасности нет в концентрированной энергосистеме, но в рассматриваемых случаях, если не обратить внимания на это требование, могут возникать схемы, опасные в эксплуатации. Опасность состоит в том, что обычная коммутация, осуществляемая, например, на РП по переводу питания с одной линии на другую с замыканием секционного выключателя, в случае несинхронных напряжений приведет к синхронизации генераторов при неконтролируемой разности частот и фаз их напряжений. Включение в противофазу или любое другое включение, при котором не наступит немедленная синхронизация генераторов, а разность фаз их напряжений достигнет  $180^\circ$ , приведет к снижению напряжения на дан-

ном и других РП почти до нуля и нарушению работы всех двигателей. В некоторых случаях возможно и повреждение генераторов.

Существенным недостатком ГТУ, особенно проявляющимся при КЗ в энергосистемах, является несовершенная система регулирования турбины, которая не обеспечивает сохранения агрегатов в работе при полных сбросах мощности. Не ясны возможности быстрой разгрузки турбин при аварийных ситуациях, что при надлежащих параметрах могло бы значительно улучшить динамические свойства ГТГ.

По опыту работы авторов для всех рассмотренных вопросов устойчивости ГТГ можно в каждом конкретных условиях найти приемлемое решение, обеспечивающее необходимый уровень устойчивости ГТГ и нагрузки, но в разных условиях эти решения оказываются различными. В простейшем случае задача сводится к ограничению значения нагрузки так, чтобы суммарная номинальная мощность нормально работающих генераторов значительно превышала значение нагрузки. Ограничение нагрузки определяется условиями пуска двигателей и возможностями быстрого отключения КЗ. При необходимости прорабатываются специальные противоаварийные мероприятия.

Допустимость нарушений динамической устойчивости ГТЭС и нагрузки при тех или иных возмущениях определяется действующими нормативами и теми последствиями для потребителя и ГТЭС, которые могут иметь место после нарушений устойчивости: нарушение технологического процесса у потребителя, отключение ГТГ и т. д. Если потребитель имеет непрерывный технологический процесс, нарушение которого связано со значительным экономическим ущербом, угрозой загрязнения окружающей среды и т. п., то первоочередное значение приобретает анализ всех взаимосвязанных переходных процессов в электрическом и технологическом оборудовании и ГТЭС, и потребителя. Соответственно на самых ранних стадиях проектирования должны разрабатываться комплексные противоаварийные мероприятия, которые охватывают не только всю систему выработки и распределения энергии ГТЭС вместе с релейной защитой и автоматикой, но и технологическое оборудование потребителя, особенно если последний тоже является объектом проектирования [3].

Можно надеяться, что в будущем будут разработаны детальные нормы проектирования противоаварийных мероприятий для ГТЭС малой и средней мощности, работающих автономно или со «слабой» связью с энергосистемой. Пока же разработка таких мероприятий возможна только по конкретным объектам. Следует подчеркнуть,

что реализация противоаварийных мероприятий возможна только тогда, когда задачи обеспечения надежного электроснабжения потребителей ставятся на начальном этапе проектирования ГТЭС и системы электроснабжения в целом, так как разработка таких мероприятий, как показывает практика, требует коррекции отдельных проектных решений.

Отметим также, что на практике приходится учитывать отличие условий работы газовых турбин в составе ГТУ электростанций от условий их работы на кораблях или самолетах. Это связано, прежде всего, с тем, что переходные процессы в электрической сети энергосистемы могут вызвать резкие и значительные колебания электромагнитного момента генератора, который прикладывается к валу генератора — турбины.

Резкие изменения момента генератора могут привести к поломке агрегата. Основным расчетным случаем является, как известно, момент, возникающий при внезапном трехфазном КЗ на выводах генератора. В энергосистемах приходится считаться и с другими случаями возникновения опасных моментов [4]. Для тех ГТГ малой и средней мощности, которые имеют достаточно «жесткие» связи с другими генераторами энергосистемы, изменения момента генераторов могут быть еще более значительными, чем для крупных генераторов той же энергосистемы, так как по отношению к таким ГТГ остальная энергосистема является почти что «шинами бесконечной мощности».

На рис. 4 в качестве примера показаны изменения электромагнитного момента ГТГ, рассчитанные для одной из проектируемых ГТЭС, в весьма обыкновенной ситуации: при двухфазном КЗ на землю вблизи шин 110 кВ этой ГТЭС. Длительность КЗ — 0,5 с; в результате КЗ нарушается устойчивость ГТГ, но затем происходит ресинхронизация и восстанавливается нормаль-

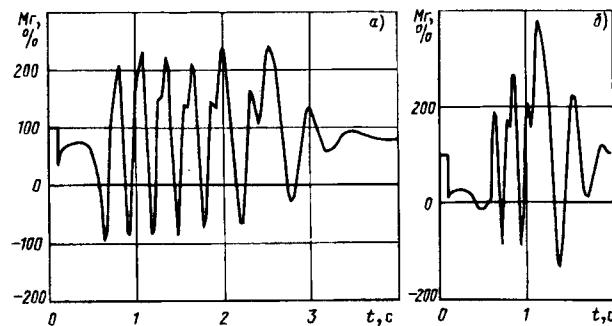


Рис. 4. Пример переменных составляющих электромагнитного момента ГТГ при возникновении КЗ на стороне 110 кВ и после его отключения (без учета влияния апериодических составляющих тока ГТГ и потерь активной мощности в статорах ГТГ): а — в работе 14 ГТГ; б — в работе пять ГТГ

ный режим. Чем меньше (при прочих равных условиях) число работающих на ГТЭС генераторов, тем больше амплитуда колебаний момента, но и большая вероятность быстрого восстановления нормального режима.

Еще более значительные колебания момента возможны в упомянутых выше и недопустимых несинхронных включенных генераторов при неконтролируемой разности частот и фаз их напряжений. Последствия такой коммутации на ГТЭС показаны на рис. 5. Здесь секция, на которой работал один ГТГ 20 МВт с двигательной нагрузкой, была несинхронно подключена к другой секции, которая имела аналогичную нагрузку, питалась от двух таких же ГТГ и от энергосистемы через трансформатор 25 МВ·А. Несинхронное включение вызвало весьма значительные колебания момента и привело к резкому снижению напряжения и нарушению устойчивости всех двигателей.

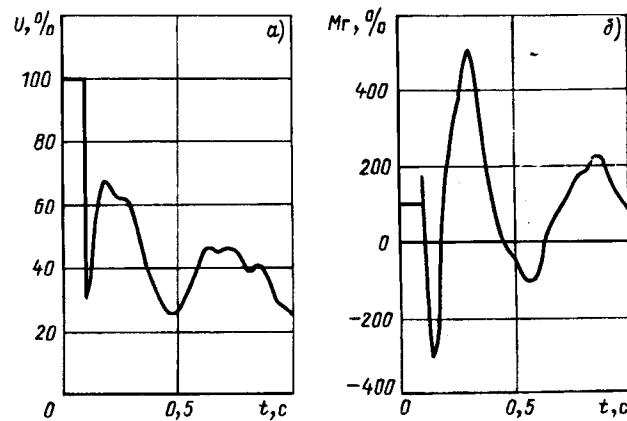


Рис. 5. То же, что и рис. 4, но для случая замыкания секционного выключателя между секциями шин с несинхронно работающими ГТГ: а — напряжение; б — электромагнитный момент

В какой мере указанные броски момента ГТГ могут быть опасными, также полностью определяется конкретными условиями.

**Выводы.** 1. Система электроснабжения, в которой газотурбинная электростанция слабо связана с энергосистемой или изолирована от нее, может с большой вероятностью оказаться неработоспособной, поэтому необходимо принимать меры в двух направлениях:

совершенствовать систему управления газовой турбиной;

при проектировании системы электроснабжения с ГТЭС выполнять расчетный анализ тяжелых кратковременных режимов (в частности пусков двигателей) и аварийных режимов (при КЗ) и выбирать необходимые противоаварийные мероприятия.

2. Выбор эффективных противоаварийных ме-

роприятий зависит от параметров электроприемников и других местных условий.

3. Дополнительным ограничением, накладываемым на выбор оборудования и схемы электроснабжения, могут стать переменные механические воздействия на вал генератора при коммутациях в электрических цепях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспектива применения газовых турбин в энергетике. — Теплоэнергетика, 1992, № 9.
2. Гуревич Ю.Е., Ливова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Гуревич Ю.Е., Файисович Д.Л., Хвошинская З.Г. Особенности электроснабжения промышленных предприятий с непрерывными технологическими процессами. — Электротехничество, 1990, № 1.
4. Хачатуров А.А. Несинхронные включения и ресинхронизация в энергосистемах. — М.: Энергия, 1977.

106.06.95

Авторы: Борисов Юрий Васильевич окон-

чил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1961 г. Главный электрик НПП «Энергопрспектива»

Гуревич Юрий Ефимович окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1959 г. В 1970 г. защитил кандидатскую диссертацию по вопросам устойчивости энергосистем в МЭИ. Заведующий сектором Научно-исследовательского института электроэнергетики (АО ВНИИЭ).

Пойдо Алексей Иванович окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1961 г. Старший научный сотрудник МЭИ.

Хвошинская Зоя Георгиевна окончила электроэнергетический факультет МЭИ в 1958 г. В 1968 г. защитила кандидатскую диссертацию по вопросам применения разных типов систем возбуждения и АРВ для повышения устойчивости энергосистем в МЭИ. Заведующая лабораторией института «Энергосетьпроект»

## Влияние конструктивных параметров кабельных линий высокого напряжения на их эксплуатационные характеристики

ВОЙТОВИЧ Р.А., КАДОМСКАЯ К.П.

Приводится методика выбора конструктивных параметров триаксиального подводного кабеля исходя из минимума дополнительных потерь в экране и броне и уменьшения интенсивности электромагнитного поля по трассе кабельной линии (КЛ), влияющего на ихтиофауну водоемов. Показано, что обеспечение эксплуатационной надежности может быть достигнуто путем соединения экрана и брони по трассе КЛ через каждые 3—4 км. Оптимизация габаритов кабельных линий трехфазного исполнения включает в себя выбор соотношений между основными конструктивными габаритами газоизолированной линии на основе минимизации напряженности электрического поля в диэлектрике в нормальном эксплуатационном режиме. Потери в металлической оболочке за счет вихревых токов могут быть уменьшены путем нанесения на внутреннюю поверхность оболочки та-кой линии покрытия толщиной 1—2 мм из хорошо проводящего материала.

Ключевые слова: высоковольтные кабельные линии, проектирование, конструкция, эксплуатационная надежность

Внедрению подземных и подводных электропередач высокого напряжения должен предшествовать большой объем исследований, связанный с обеспечением их эксплуатационной надежности,

The paper presents a method for choosing design parameters of a three-axial underwater cable in consideration of minimum additional losses in a sheath and an armour and reduction of intensity of the electromagnetic field along cable line which exerts influence on the ichthyofauna of water reservoirs. It is shown that service reliability can be achieved by connecting a sheath and an armour along cable line at every 3—4 km. Optimization of dimensions of three-phase cable lines includes the choice of correlations of basic design dimensions of a gas-insulated line on the basis of minimization of the electric field intensity in a dielectric under normal operating condition. Losses in a metal sheath due to eddy current can be reduced by coating the inner surface of a sheath with a well-conducting material 1—2 mm thick.

Ключевые слова: high-voltage power transmission cable lines, design, construction, service reliability

экономичности и экологической безопасности. Эти вопросы должны решаться на всех стадиях внедрения кабельной линии (КЛ): при ее конструировании, при проектировании трассы и спо-

себя прокладки, а также при эксплуатации такой электропередачи. В статье предпринята попытка решения поставленной задачи применительно к подводным кабельным линиям, представляющим собой трехфазную систему кабелей однофазного исполнения и к кабелям трехфазного исполнения, три фазы которых заключены в общую металлическую (стальную) оболочку.

**Оптимизация конструктивных параметров подводных кабельных линий.** В качестве минимизируемых факторов принимались: дополнительные потери в заземленных по концам строительного участка экранах и броне фаз кабельной линии, уровень электромагнитного поля по трассе КЛ, уровни перенапряжений, возникающих на изоляции жил и экранов при воздействии грозовых перенапряжений.

Снижение дополнительных потерь в экранах и броне приводит к уменьшению нагрева основной изоляции кабеля и, следовательно, к повышению его пропускной способности (экономичности подводной и подземной электропередачи). Снижение уровня электромагнитного поля по трассе КЛ уменьшает антропогенное влияние на ихтиофауну пересекаемого водоема. Ограничение же уровня перенапряжений повышает надежность эксплуатации изоляции жилы и экрана, и следовательно, кабельной линии в целом.

Исследования показали [1], что основными конструктивными факторами, влияющими на уровень дополнительных потерь, на интенсивность электромагнитного поля по трассе КЛ, а также на уровни перенапряжений, возникающих на изоляции экранов, являются толщина и материал экранов и брони. Если броня кабеля выполнена из медных и стальных проволок (комбинированная броня), то при конкретном материале экрана указанные выше характеристики кабельной линии зависят от двух факторов: толщина экрана и числа медных проволок в броне.

Исследования [2] также показали, что определяющей характеристикой электромагнитного поля по трассе КЛ, влияющей на представителей ихтиофауны водоемов, является продольный ток, протекающий в водной среде по трассе КЛ. Таким образом, при использовании метода многофакторного планирования эксперимента могут быть получены регрессионные полиномы, связывающие функции отклика ( $P_{\text{доп}}$  — дополнительные потери в экранах и броне;  $\delta_{\text{ср}}$  — продольная плотность тока в водной среде и  $U_{\text{тэ}}$  — максимальное напряжение на изоляции экрана, заземленного по концам строительной длины КЛ) с влияющими факторами — толщиной экрана  $\Delta_3$  и числом медных проволок в броне  $N$ :

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{доп}}/P_{\text{ж}} &= b_{0p} + b_{1p} \Delta_3 + b_{2p} N + \\ &+ b_{3p} \Delta_3^2 + b_{4p} N^2 + b_{5p} \Delta_3 N; \\ \delta &= b_{0\delta} + b_{1\delta} \Delta_3 + b_{2\delta} N + b_{3\delta} \Delta_3^2 + b_{4\delta} N^2 + b_{5\delta} \Delta_3 N; \\ U_{\text{тэ}}/U_{\text{фм}} &= b_{0u} + b_{1u} \Delta_3 + b_{2u} N + \\ &+ b_{3u} \Delta_3^2 + b_{4u} N^2 + b_{5u} \Delta_3 N. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

На основе полиномов (1) могут быть найдены значения  $\Delta_3$  и  $N$ , отвечающие минимуму каждой из функций отклика  $Y$  (при этом  $N$  считается непрерывной величиной):

$$\frac{dY}{d\Delta_3} = 0; \quad \frac{dY}{dN} = 0; \quad (Y = P_{\text{доп}}/P_{\text{ж}}, \delta, U_{\text{тэ}}). \quad (2)$$

Конструктивные параметры КЛ, отвечающие локальным оптимумам, получены путем минимизации каждого из выбранных критериев. Совместное рассмотрение локальных оптимумов позволяет сформулировать требования к конструкции КЛ.

Решим сформулированную задачу применительно к случаю бестраншейной прокладки КЛ, т.е. такой прокладки, при которой процессы в фазах КЛ могут рассматриваться независимо друг от друга, так как по условиям эксплуатационной надежности кабели отдельных фаз прокладываются на значительном (десятки метров) расстоянии друг от друга. Такая прокладка кабеля является наиболее неблагоприятной с точки зрения значений выбранных критериев из-за отсутствия взаимной электромагнитной компенсации токов, текущих по экранам и броне в нормальном эксплуатационном режиме.

При определении  $P_{\text{доп}}/P_{\text{ж}}$  и основных характеристиках электромагнитного поля по трассе КЛ (продольные напряженности электромагнитного поля  $E$  и плотность тока  $\delta$ , а также напряженность магнитного поля  $H$  в водной среде) расчетным являлся нормальный эксплуатационный режим кабельной электропередачи (рис. 1, а). При определении же максимальных перенапряжений на изоляции экрана  $U_{\text{тэ}}$  рассматривалось грозовое поражение ВЛ, примыкающей к КЛ.

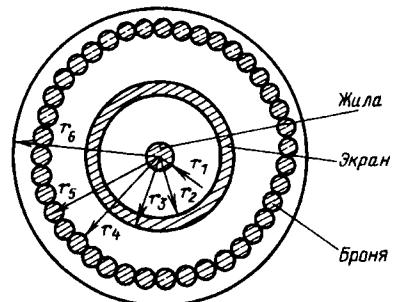


Рис. 1. Расчетные схемы замещения: а — при определении токов в металлических элементах кабеля и водной среде; б — при анализе перенапряжений на изоляции экрана при грозовом поражении ВЛ

Функции отклика  $P_{\text{доп}}/P_{\text{ж}}$ ,  $E$ ,  $\delta$  и  $H$  определялись по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_{\text{доп}}}{P_{\text{ж}}} &= \frac{I_{\text{ж}}^2}{I_{\text{ж}}^2} \frac{R_{\text{ж}}}{R_{\text{ж}}} + \frac{I_{\text{бр}}^2}{I_{\text{ж}}^2} \frac{R_{\text{бр}}}{R_{\text{ж}}}; \\ |\delta_x(r)| &= \frac{|I_{\text{ср}}| m}{2\pi r_k} \frac{\sqrt{\text{ker}^2(mr) + \text{kei}^2(mr)}}{\sqrt{\text{ker}_1^2(mr_k) + \text{kei}_1^2(mr_k)}}; \\ |E_x(r)| &= \frac{|\delta_x(r)|}{\gamma_{\text{ср}}}; \\ |H_{\Phi}(r)| &= \frac{|I_{\text{ср}}|}{2\pi r_k} \frac{\sqrt{\text{ker}^2(mr) + \text{kei}^2(mr)}}{\sqrt{\text{ker}_1^2(mr_k) + \text{kei}_1^2(mr_k)}}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $R_{\text{ж}}$ ,  $R_{\text{бр}}$ ,  $R_{\text{бр}}$  — активные сопротивления жилы, экрана и брони на частоте 50 Гц;  $I_{\text{ср}} = I_{\text{ж}} + I_{\text{бр}} + I_{\text{бр}}$ ;  $m = \sqrt{\mu_0 \gamma_{\text{ср}} \omega}$ ;  $\text{ker}(x)$ ,  $\text{kei}(x)$ ,  $\text{ker}_1(x)$ ,  $\text{kei}_1(x)$  — функции Кельвина нулевого и первого порядков.

Из выражений (3) следует, что как дополнительные потери, так и характеристики поля в водной среде зависят от токов, текущих по экрану и броне в нормальном эксплуатационном режиме. При известном токе в жиле, заданном нормальным эксплуатационным режимом КЛ, токи в экране и броне определяются как:

$$\frac{I_{\text{ж}}}{I_{\text{ж}}} = \frac{z_{23}^2 - z_{12} z_3}{z_2 z_3 - z_{23}^2}, \quad \frac{I_{\text{бр}}}{I_{\text{ж}}} = \frac{z_{23} (z_{12} - z_2)}{z_2 z_3 - z_{23}^2}, \quad (4)$$

где  $z_2$  и  $z_3$  — продольные сопротивления петель экран—водная среда и броня—водная среда соответственно;  $z_{12}$  и  $z_{23}$  — продольные взаимные сопротивления между петлями жила—среда и экран—среда, экран—среда и броня—среда соответственно.

Методика определения собственных и взаимных сопротивлений приведена, в частности, в [3].

Напряжение на изоляции экрана при коротком замыкании на ВЛ в месте сопряжения ВЛ с КЛ (рис. 1, б) может быть определено по следующей формуле [4]:

$$U_{\text{мэ}} = U_{\Phi \text{fm}} \frac{R_{\text{ж}} C_1}{R_2 C_2 - R_1 C_1} (e^{-\alpha_1 l/2} - e^{-\alpha_2 l/2}), \quad (5)$$

где  $\alpha_1 = R_1/2z_{\text{в1}}$ ;  $\alpha_2 = R_2/2z_{\text{в2}}$ ;  $z_{\text{в1}} = \sqrt{L_1/C_1}$ ;  $z_{\text{в2}} =$

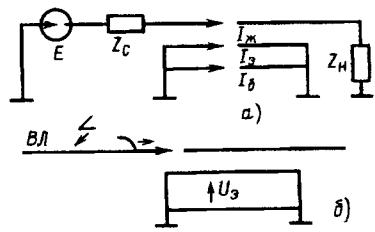


Рис. 2. Эскиз конструкции триаксиального кабеля однофазного исполнения

$$= \sqrt{L_2/C_2}; \quad C_1 = 2\pi\epsilon_0\epsilon_1/\ln(r_2/r_1); \quad C_2 = 2\pi\epsilon_0\epsilon_2/\ln(r_4/r_3); \quad L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(r_2/r_1); \quad L_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(r_4/r_3); \quad R_1 = R_{\text{ж}} + R_{\text{бр}}; \quad R_2 = R_{\text{бр}} + R_{\text{бр}}$$

$l$  — длина кабельной линии. Значения факторов в точках композиционного ортогонального плана, составленного на основе полного факторного эксперимента (ПФЭ), даны в табл. 1. Расчеты проводились применительно к кабелю с пластмассовой изоляцией 110 кВ типа АПвП-110/625:  $r_1 = 10,55$  мм;  $r_2 = 28,4$  мм;  $r_4 - r_3 = 5$  мм;  $r_5 - r_4 = 4$  мм,  $r_6 - r_5 = 5$  мм (рис. 2).

В табл. 2 приведены значения  $\Delta_3$  и  $N$ , отвечающие локальным минимумам рассматриваемых функций отклика, полученные по выражениям (2) для полных квадратичных полиномов:

$$\Delta_{3,\text{опт}} = \frac{b_1 b_5 - 2b_2 b_3}{4b_3 b_4 - b_5^2}; \quad N_{\text{опт}} = \frac{b_2 b_5 - 2b_1 b_4}{4b_3 b_4 - b_5^2}. \quad (6)$$

Следует отметить, что минимум напряжения на изоляции экрана достигается при максимальной из рассмотренных толщине экрана (4 мм) и наименьшем числе медных проволок в броне, т. е. при наименьших значениях сопротивления экрана и проводимости брони (при сверхпроводящем экране напряжение на изоляции заземленного в начале КЛ экрана будет равно нулю, а при сверхпроводящей броне будет максимальным, так как электромагнитное поле при этом не проникает в водную среду).

Из табл. 2, в частности, следует, что применение экрана из меди приводит к уменьшению дополнительных потерь и тока в среде, а следовательно, и интенсивности электромагнитного

Таблица 1

Номер точек плана	Число медных проволок $N$	Толщина экрана $\Delta_3$ , мм	Значение функции отклика					
			Экран из меди			Экран из свинца		
			$P_{\text{доп}}/P_{\text{ж}}$	$I_{\text{ср}}/I_{\text{ж}}$	$U_{\text{мэ}}/U_{\Phi \text{fm}}$	$P_{\text{доп}}/P_{\text{ж}}$	$I_{\text{ср}}/I_{\text{ж}}$	$U_{\text{мэ}}/U_{\Phi \text{fm}}$
1	58	4	0,16	0,260	0,007	0,28	0,046	0,063
2	2	4	0,28	0,040	0,004	2,18	0,340	0,043
3	58	1	0,25	0,043	0,028	0,30	0,049	0,107
4	2	1	1,05	0,150	0,015	3,00	0,630	0,070
5	58	2,5	0,20	0,030	0,012	0,46	0,048	0,084
6	2	2,5	0,45	0,064	0,006	2,66	0,600	0,048
7	30	4	0,20	0,032	0,007	0,50	0,083	0,061
8	30	1	0,40	0,064	0,030	0,55	0,092	0,106
9	30	2,5	0,27	0,430	0,011	0,55	0,400	0,083

Таблица 2

 $(\gamma_{cp}=1 \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}, I_{jk}=500 \text{ A})$ :

Минимизируемые характеристики	Материал экрана	Оптимальные конструктивные параметры	
		$\Delta_{\text{э,опт}}$ , мм	$N_{\text{опт}}$
$P_{\text{доп}}/P_{jk}=0,136$	Медь	3,5	40
		3,25	49
		4,0	2
$P_{\text{доп}}/P_{jk}=0,215$	Свинец	2,3	48
		2,4	47
		4,0	2

поля примерно вдвое (по сравнению с конструкцией с экраном из свинца) и примерно к десятикратному снижению перенапряжений на изоляции экрана. Следовательно, применение меди в качестве материала для изготовления экрана приводит к существенному улучшению всех эксплуатационных характеристик подводной кабельной линии.

Из табл. 2 также следует, что оптимальные конструктивные параметры экрана и брони, полученные на основе минимизации дополнительных потерь и интенсивности электромагнитного поля в водной среде, практически совпадают. Поэтому целесообразно выбирать толщину экрана и процентное содержание медных проволок в броне исходя из минимума первых двух характеристик, а ограничения перенапряжений на изоляции добиваться путем уменьшения расстояния между точками соединения экрана и брони по трассе кабельной линии [уменьшение  $l$  в выражении (5)].

В табл. 3 приведены значения  $P_{\text{доп}}/P_{jk}$ ,  $I_{cp}/I_{jk}$ ,  $U_{mz}/U_{\text{фм}}$  для кабеля с оптимальными конструктивными параметрами. В этой же табл. 3 для сравнения приведены данные для разработанного кабеля типа АПвП-110/625.

Таблица 3

Материал экрана	Тип конструкции	Эксплуатационные характеристики КЛ с пластмассовой изоляцией 110 кВ				
		$N_{\text{м}}/N_{\Sigma}$	$\Delta_{\text{э}}$ , мм	$P_{\text{доп}}/P_{jk}$	$I_{cp}/I_{jk}$	$U_{mz}/U_{\text{фм}}$
Медь	Опти-мальная	0,81	3,25	0,140	0,023	0,009
Свинец	Опти-мальная	0,81	2,4	0,252	0,043	0,086
Медь	АПвП-110/625	0,156	2,5	0,440	0,064	0,006

Из табл. 3 следует, что оптимизация конструкции экрана и брони позволила уменьшить дополнительные потери и ток в среде примерно в 3 раза. В этом же соотношении уменьшатся и основные характеристики электромагнитного поля в непосредственной близости от КЛ

$\Delta_{\text{з}}$ , мм	$r_k$ , мм	$I_{cp}$ , мм	$H_{\Phi}$ , А/м	$\delta_x$ , А/м <sup>2</sup>	$E_x$ , В/м
3,25	45,65	11,7	40,8	0,0053	0,0053
2,50	44,90	32,0	113,0	0,0144	0,0144

Если учесть, что пороговое значение плотности тока в водной среде, приводящее к возбуждению рыб, лежит в диапазоне 0,01–0,12 А/м<sup>2</sup> [2], то из приведенных данных видно, что оптимизация позволила обеспечить безопасный электромагнитный фон антропогенного происхождения в водной среде.

Оценим возможное повышение пропускной способности КЛ при снижении дополнительных потерь в экране и броне примерно в 3 раза. Длительно допустимую нагрузку можно найти на основе «теплового» закона Ома:

$$\Delta\theta = PR, \quad (7)$$

где  $\Delta\theta$  — разность температур на изотермических поверхностях кабеля и окружающей среды;  $P$  — тепловой поток, проходящий через эти поверхности;  $R$  — термическое сопротивление элементов кабеля.

При прокладке кабеля в водной среде можно пренебречь тепловым сопротивлением этой среды и потерями в полиэтиленовой изоляции, так как эти потери составляют незначительную долю потерь в металлических элементах конструкции кабеля. При этих допущениях перепад температур определится как

$$\theta_{jk} - \theta_0 = P_{jk} \left\{ R_{d1} + R_{d2} \left( 1 + P_3/P_{jk} \right) + R_{d3} \left( 1 + P_3/P_{jk} + P_6/P_{jk} \right) \right\}, \quad (8)$$

где  $R_d = \frac{\sigma_d}{2\pi} \ln \frac{r_{k+1}}{r_k}$  — термическое сопротивление изоляции;  $(r_{k+1}-r_k)$  — толщина изоляции;  $\sigma_d$  — удельное тепловое сопротивление диэлектрика ( $\sigma_d=3,5 \text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$  — для полиэтилена;  $\sigma_d=5 \text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$  — для полихлорвинала — изоляции экрана и брони).

Отношения  $(\theta_{jk} - \theta_0)/P_{jk}$  для оптимальной конструкции и разработанной в настоящее время оказались равными:

$$\frac{(\theta_{jk} - \theta_0)}{P_{jk}} = \begin{cases} 0,705 \text{ К}/\text{Вт} & \text{для оптимальной конструкции;} \\ 0,908 \text{ К}/\text{Вт} & \text{для конструкции типа АПвП-110/625.} \end{cases}$$

Следовательно, один и тот же перепад температур в этих конструкциях (одна и та же температура жилы) достигается при увеличенной примерно в 1,3 раза мощности потерь в жиле оптимальной конструкции, т. е. при увеличенной токовой нагрузке жилы примерно на 15%. Таким

образом, уменьшение дополнительной мощности потерь в 3 раза в рассматриваемой конструкции приводит к увеличению пропускной способности КЛ на 15%.

Из табл. 3 следует, что в оптимизированной конструкции напряжение на изоляции экрана примерно в 1,5 раза превышает напряжение на этой изоляции в разработанной конструкции. Оценим напряжение на изоляции при грозовом поражении ВЛ, примыкающей к КЛ. Амплитуда срезанной за счёт перекрытия линейной изоляции 110 кВ волны, действующей на кабельную линию, с вероятностью около 0,05 превышает 2700 кВ. При длине подводной КЛ 25 км напряжение на изоляции экрана снижается до значения, допустимого с учетом возникающих водных триингов примерно 6 кВ, путем соединения экрана с броней по трассе через каждые 3 км для оптимальной конструкции и через 4 км при использовании кабеля АПвП-110/625 с толщиной экрана 2,5 мм.

Таким образом, оптимизация конструкции КЛ позволяет уменьшить примерно в 3 раза интенсивность электромагнитного поля по трассе КЛ и увеличить пропускную способность кабельной линии примерно на 15%. Расстояние между муфтами, в которых экран соединяется с броней при оптимальной конструкции кабеля, равно примерно 3 км, что вполне приемлемо.

Следует отметить, что в случае траншейной укладки двухцепных КЛ и наличия кабелей, уложенных в резервную траншею, может возникнуть ситуация, при которой в резервной траншее окажутся подключенными две одноименные фазы (в обеих цепях вышло из строя по одной одноименной фазе). В этом случае за счет отсутствия электромагнитной компенсации существенно возрастают как дополнительные потери, так и (что гораздо более существенно) интенсивность поля антропогенного происхождения: примерно в 1,3–1,5 раза по сравнению со случаем изолированной прокладки КЛ. Это обстоятельство необходимо учитывать при коммутировании рабочих и резервных фаз на переключательном пункте, расположенным на берегу водоема.

**Оптимизация конструктивных параметров кабелей трехфазного исполнения.** Оптимизация конструктивных параметров кабелей трехфазного исполнения связана с выбором отношений  $r/R$  и  $b/R$  (рис. 3), отвечающих минимуму относительной напряженности электрического поля в нормальном эксплуатационном режиме ( $E^x = ER/U_\phi$ ,  $U_\phi$  — номинальное фазное напряжение), и выбором внутреннего радиуса оболочки  $R$ , определяемого уровнем действующих перенапряжений. Задача оптимизации отношений  $r/R$  и  $b/R$  рассматривалась в [5] с помощью

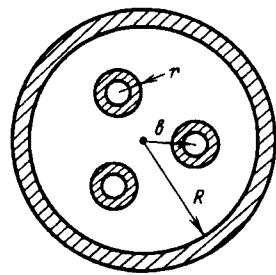


Рис. 3. Эскиз конструкции газоизолированной линии высокого напряжения

отображения в круге и в [6] при применении метода конформных отображений с использованием понятия комплексного потенциала. В этих работах оптимальные соотношения оказались равными  $r/R \approx 0,2$ ,  $b/R \approx 0,5$ . При этих соотношениях между конструктивными габаритами относительная напряженность, рассчитанная с помощью метода конформных отображений, составляет  $E^x = 4,1$ . Таким образом, номинальное напряжение, внутренний радиус оболочки и допустимая напряженность электрического поля в диэлектрике связаны между собой следующим образом:

$$E_{\text{доп}} R / U_\phi = 4,1,$$

откуда следует, что если  $E_{\text{доп}} = 3$  кВ/мм, то внутренние радиусы оболочки кабелей 110, 220 и 500 кВ равны 0,09; 0,17 и 0,4 м соответственно. В настоящее же время внутренний радиус газоизолированной линии (ГИЛ) принимается равным 0,5 м. Следовательно, при оптимизации конструктивных габаритов в соответствии с приведенными соотношениями внутренний радиус оболочки может быть уменьшен на 20%. Обеспечение надежной эксплуатации конструкций с уменьшенными изоляционными промежутками требует анализа перенапряжений в типовых схемах использования КЛ того или иного типа с учетом аппаратных или каких-либо других мер защиты. Следует отметить, что анализ коммутационных перенапряжений, возникающих в цикле ТАПВ ГИЛ, примыкающей к ВЛ или ТАПВ системы ВЛ–ГИЛ, показал, что минимум напряженности в диэлектрике в переходном режиме будут отвечать все те же соотношения между габаритами, которые были получены ранее исходя из оптимизации конструкции в нормальном эксплуатационном режиме. Поскольку, однако, протяженность кабельных и газоизолированных линий невелика (не более 20–25 км), то условия эксплуатации защитных аппаратов определяются воздействием грозовых перенапряжений.

Анализ грозовых перенапряжений в типовых схемах использования ГИЛ 500 кВ (вставки в воздушную линию в виде ВЛ–ГИЛ–ВЛ, питание

крупных промышленных центров и КРУЭ по схемам ВЛ—ГИЛ—ПЦ и ВЛ—ГИЛ—КРУЭ), произведенный с помощью метода планирования эксперимента (функция отклика — максимум перенапряжений на изоляции ГИЛ — зависела от двух случайных факторов: амплитуды и крутизны волны тока молнии в месте удара молнии в ВЛ) показал, что при отсутствии специальных аппаратов для ограничения перенапряжений их максимумы, подчиненные  $\beta$ -распределению 1-го типа и усеченному нормальному закону, во всех схемах превышают допустимый для изоляции ГИЛ-500 уровень (1550 кВ согласно рекомендации МЭК). Уровни перенапряжений, вероятность превышения которых составляет 0,05:

3140 кВ — в схеме ВЛ—ГИЛ—ВЛ;

4080 кВ — в схемах ВЛ—ГИЛ—КРУЭ и ВЛ—ГИЛ—ПЦ.

Исследования показали, что добиться приемлемого уровня перенапряжений для конструкции со сниженным внутренним радиусом оболочки можно установкой защитных аппаратов с характеристиками, допустимыми в настоящее время для защиты ВЛ 500 кВ ( $U_{ост}=920$  кВ при токе 10 кА), по обоим концам ГИЛ. При этом в наиболее «тяжелой» из расчетных схем ВЛ—ГИЛ—ПЦ ( $l_{гил}=10-20$  км) перенапряжения на уровне надежности 0,95 не превышают уровня 1055 кВ, а токи через ограничители на том же уровне надежности не превышают 20 кА. При таком ограничении перенапряжений испытательное напряжение для изоляции ГИЛ может быть принято равным 1250 кВ, т. е. на 20% ниже уровня, принятого МЭК, и, следовательно, внутренний диаметр оболочки может быть снижен с 0,5 до 0,4 м. В этом случае изоляция ГИЛ 500 кВ оказывается «приведенной к норме» [7].

Возникает вопрос, как влияет внутренний радиус оболочки на значение дополнительных потерь в ней. При расположении центров токопроводов ГИЛ в вершинах правильного треугольника в оболочке текут лишь токи, обусловленные эффектом близости. При этом при толщине оболочки 5—10 мм согласно [8] потери в оболочке, отнесенные к технологическим потерям в токопроводах, могут быть определены по выражению

$$\frac{P_{об}}{P_{ток}} = \frac{3mS_{ток}\gamma_{ток}}{4\pi\sqrt{2}R\gamma_{об}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b^{*2n}}{\frac{n^2(\mu_{об}-1)^2}{m^2R^2} + 1 + \frac{\sqrt{2}n(\mu_{об}-1)}{mR_1}},$$

где  $m=\sqrt{\gamma_{об}\omega\mu_{об}\mu_{об}}$ ;  $S_{ток}$  — сечение токопровода;  $b^*=b/R$ ;  $\mu_{об}$  — относительная магнитная проницаемость оболочки.

Из выражения (8) следует, что потери в оболочке зависят как от характеристик материала оболочки, так и от конструктивных параметров

$b$  и  $R$ . При оптимальном значении  $b/R=0,5$  единственным конструктивным параметром, от которого зависят потери в оболочке, является ее внутренний радиус  $R$ . Расчеты показывают, что при реальных характеристиках стальной оболочки максимуму дополнительных потерь соответствует  $R=0,4-0,6$  м, т. е. именно рассматриваемый диапазон радиусов ГИЛ 500 кВ. Расчеты, связанные с анализом теплового режима ГИЛ, показали, что при подземной прокладке ГИЛ предельная мощность, передаваемая по ГИЛ 500 кВ, составляет 1,2 ГВ·А, а при прокладке ГИЛ на воздухе — 4 ГВ·А. Увеличение же пропускной способности связано с уменьшением дополнительных потерь в оболочке ГИЛ. В [8] предложено для этой цели нанесение на внутреннюю поверхность оболочки покрытия толщиной 1—2 мм из хорошо проводящего немагнитного материала, например из алюминия или меди. Так, нанесение покрытия из алюминия толщиной 1 мм приведет к уменьшению потерь в оболочке примерно в 1,5 раза (при этом потери в покрытии в 7 раз превышают потери в стальной оболочке), при толщине покрытия в 2 мм потери в оболочке снизились примерно в 6 раз. При этом пропускная способность ГИЛ может быть повышена на 13 и 30% при прокладке в грунте и на 6 и 14% при прокладке на воздухе (большие значения относятся к покрытию толщиной 2 мм, меньшие — 1 мм).

**Выводы.** 1. При конструировании кабелей, проектировании кабельных линий, а также при организации эксплуатации необходимо применять системный подход, основанный на одновременном учете факторов экономичности, эксплуатационной надежности и экологической совместимости с живой и неживой природой на всех указанных стадиях сооружения подземных и подводных электропередач высокого напряжения.

2. При проектировании подводных кабельных линий на основе триаксиальных кабелей однофазного исполнения повышения пропускной способности КЛ (экономический фактор) и снижения антропогенного влияния на ихтиофауну (экологический фактор) можно добиться путем оптимизации толщины и материала экрана, а также конструкции брони.

При траншейной прокладке фаз КЛ и наличии специальной траншеи с резервными фазами уменьшения антропогенного влияния на ихтиофауну можно добиться применением заранее разработанной системы подключения резервных фаз, исключающей случаи, когда в резервной траншее оказываются подключенными две одноименные фазы КЛ.

Повышение эксплуатационной надежности достигается соединением с помощью специальных

муфт экрана и брони фаз КЛ через каждые 3–4 км по трассе КЛ.

3. Повышения экономичности эксплуатации кабельных линий трехфазного исполнения (например ГИЛ ТИ) можно добиться путем оптимизации поля в нормальном эксплуатационном режиме ( $r/R=0,2$ ;  $b/R=0,5$ ), что позволяет снизить внутренний радиус оболочки и тем самым уменьшить капитальные затраты на сооружение ГИЛ, а также путем снижения дополнительных потерь от вихревых токов в оболочке, обусловленных эффектом близости, с помощью нанесения на внутреннюю поверхность оболочки покрытия толщиной 1–2 мм из хорошо проводящего немагнитного материала. Это позволяет повысить экономичность эксплуатации ГИЛ за счет повышения ее пропускной способности на 15–30% при прокладке ГИЛ в грунте и на 6–14% при прокладке ГИЛ на воздухе.

Эксплуатационная надежность ГИЛ может быть достигнута установкой по ее концам защитных аппаратов типа ОПН для глубокого ограничения перенапряжений с характеристиками, достигнутыми в настоящее время электротехнической промышленностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадомская К.П., Озорина Е.Ю. Влияние конструкции экрана и брони кабелей подводного исполнения на их эксплуатационные характеристики. — Изв. вузов. Энергетика, 1991, № 8.

2. Влияние электромагнитного поля подводных кабельных линий на ихтиофауну / Г.Г. Данилов, К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, В.И. Чепелюков. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1991, т. 37.

3. Перенапряжения и защита от них в воздушных и

кабельных электропередачах высокого напряжения М.В. Костенко, К.П. Кадомская, М.Л. Левинштейн, И.А. Ефремов. — Л.: Наука, 1988.

4. Кадомская К.П., Лавров Ю.А. Перенапряжения на изоляции экранов подводных кабелей в броне. — Изв. вузов. Энергетика, 1990, № 6.

5. Александров Г.Н., Иванов В.Л. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения. — Л.: Энергоатомиздат, 1984.

6. Войтович Р.А., Кадомская К.П., Набоков С.Л. Оптимизация конструкций кабельных линий высокого напряжения трехфазного исполнения. Сб. научн. тр. НГТУ «Техника и электрофизика высоких напряжений». — Новосибирск, 1994.

7. Тиходеев Н.Н., Шур С.С. Изоляция электрических сетей. — Л.: Энергия, 1979.

8. Кадомская К.П., Розаков Д.В., Хорошева О.М. Методика определения потерь в стальных трубах высоковольтных кабелей трехфазного исполнения с покрытием из хорошо проводящего немагнитного материала. — Изв. вузов. Электромеханика, 1989, № 4.

[05.06.95]

*Авторы: Войтович Руслан Анатольевич окончил электроэнергетический факультет Новосибирского электротехнического института в 1993 г. Аспирант кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» НГТУ.*

*Кадомская Кира Пантелеимоновна окончила электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ) в 1950 г. В 1972 г. защитила докторскую диссертацию по теме «Исследование внутренних перенапряжений в электрических сетях высших классов напряжения и оптимизация мер их ограничения». Профессор кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).*

## Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов стран СНГ и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- **РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ** отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- **ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ** о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- **ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ**, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира на русском и английском языках. Реклама в черно-белом изображении может быть помещена на страницах журнала или на его обложке. Напоминаем наш адрес: 103012 Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10 или 101000 Москва, Главпочтamt, абонементный ящик № 648. Телефоны для справок: 924-24-80, 928-88-69.

# О надежности электроснабжения потребителей в рыночных условиях

КОЗЛОВ В.А.

Приводится критическая оценка существующей отечественной практики реализации надежности электроснабжения потребителей. В условиях рынка отмечается неизбежность материальной ответственности энергоснабжающих организаций за нарушения электроснабжения по их вине перед потребителем. Вводится понятие гарантированного электроснабжения и разбивка электроприемников на две группы. Питание приемников первой группы предусматривается от источника энергосистемы и автоматического источника потребителя. Для компенсации убытков потребителей из-за нарушения их электроснабжения предлагается создание страхового фонда надежности.

**Ключевые слова:** надежность электроснабжения, характеристики приемников и источников, страховой фонд надежности, компенсация убытков, договорные условия

Наступающие рыночные отношения, связанные с разграничением собственности, обострят ответственность энергоснабжающих организаций за надежность электроснабжения потребителей. Не исключена возможность пересмотра в целом существующей практики обеспечения надежности их электроснабжения. В ряде публикаций уже встречаются предложения по решению проблеме надежности вне рамок ПУЭ, как то: путем «заказа» потребителями требуемого уровня надежности; дифференциации тарифов в зависимости от этого уровня; компенсации энергоснабжающими организациями убытков потребителей из-за внезапного перерыва их электроснабжения.

Эти предложения отчасти связаны с определенными изъянами действующего порядка решения рассматриваемой проблемы, который к тому же исходит из условий плановой экономики, т.е. единой государственной собственности.

Действующая практика базируется на рекомендациях ПУЭ, согласно которым объем резервирования в системе электроснабжения потребителя, а тем самым уровень надежности его электроснабжения, определяется категорийностью его электроприемников. Многолетний опыт реализации требований ПУЭ и ответственности за обеспечение надежности электроснабжения потребителей показывает следующее.

С точки зрения требований к надежности электроснабжения в ПУЭ содержится только общая характеристика электроприемников.

Ранжировка конкретных приемников с их привязкой к той или иной категории надежности отмечается в ведомственных нормативах. Из-за отсутствия числовых характеристик эта ранжи-

*Measures taken in Russia for ensuring power supply reliability are subjected to criticism. It is noted that market conditions impose a financial responsibility on power supply enterprises for loss of power through their fault. The concept of guaranteed power supply is introduced. All the electroreceivers are divided into two groups. The first one is supplied from mains and from own autonomous power source. To recover consumers' losses it is proposed to establish the Reliability Insurance Fund.*

**Ключевые слова:** power supply reliability, insurance fund of reliability, characteristics of receivers and sources, damages, contracted commitments

ровка в определенной мере носит произвольный характер. Она определяется экспертным порядком на основе имеющегося опыта формирования и функционирования систем электроснабжения и последствий, которые связаны с нарушениями технологических процессов потребителей при возникновении внезапных перерывов их электроснабжения. Однако в ряде случаев трудно установить обстоятельства, с учетом которых классифицируются электроприемники. Например, к 1-й категории приемников отнесены лифты в домах высотой более 17 этажей и в турбазах и домах отдыха вместимостью более 1000 чел. Остановка лифта связана только с неудобствами для населения. При этом остановка лифтов из-за отказа их механической части и вспомогательных устройств происходит на один—два порядка чаще, чем отказы из-за повреждений питающей электросети. Подобные вопросы могут быть адресованы и ряду других приемников.

В составе потребителя обычно находятся электроприемники разных категорий. По этой причине при формировании системы его электроснабжения объем предусматриваемых резервных элементов необходимо соотносить с категорийностью каждого конкретного электроприемника, во избежание необоснованного усложнения и удорожания системы электроснабжения потребителя в целом.

Наиболее высокие требования предъявляются к надежности электроснабжения приемников 1-й категории, питание которых согласно ПУЭ должно производиться от двух независимых источников с автоматическим вводом резервного питания. Как правило, приемники 1-й категории являются ма-

личисленными и составляют часть суммарной нагрузки потребителя.

По этой причине в порядке удешевления системы электроснабжения ПУЭ рекомендуют в качестве второго независимого источника использовать не источники энергосистемы, а автономные источники питания, устанавливаемые непосредственно потребителями. Допустимо также использование связей с сетями соседних потребителей, если они удовлетворяют требованиям независимого источника.

Существующая практика формирования систем электроснабжения потребителей, к сожалению, не идет по пути их рационального построения (имеется в виду недопустимость распространения требований к надежности электроснабжения приемников высшей категории на все остальные приемники) и максимального использования упрощения систем, отмеченных в ПУЭ, а по пути ужесточения требований к надежности электроснабжения вне регламентаций ПУЭ. В частности, за счет расширения списка приемников 1-й категории; реализации системы электроснабжения потребителя целиком по требованиям надежности 1-й категории, не взирая на наличие основной массы приемников низких категорий; использования в качестве независимых источников питания только источников энергосистем.

В крупных городах, вопреки ПУЭ, в качестве независимых источников принимаются не секции РУ центров питания, а во всех случаях центр питания целиком, что равносильно резервированию разнесенных центров питания через сети напряжением 6–10 кВ. Достаточно часто для потребителей, которые в целом относятся к 1-й категории и для питания которых по технологическим нормам в обязательном порядке устанавливается автономный источник, система внешнего электроснабжения формируется все равно с питанием от двух независимых источников энергосистемы.

Стремление к ужесточению требований к надежности электроснабжения потребителей вне рамок ПУЭ ведет только к необоснованному расходу материальных ресурсов страны. Эта тенденция имеет обоядную поддержку как со стороны энергоснабжающих организаций, так и со стороны потребителей. Главная причина этого связана с обезличенностью государственной собственности и отсутствием реальной ответственности сторон за обоснованность расходования ресурсов. В качестве оправдания рассматриваемой тенденции обычно приводятся ссылки на якобы серьезную ответственность заинтересованных сторон за нарушения надежности электроснабжения потребителей. Рассмотрим подробнее, насколько реальна эта ответственность.

Согласно действующим ППЭ ответственность, фиксируемая в двухстороннем договоре на пользование электрической энергией, возлагается только на энергоснабжающую организацию, которая должна уплачивать абоненту (потребителю) в случае перерыва электроснабжения по ее вине штраф в размере восьмикратной стоимости недоотпущенной электрической энергии.

В приложении к договору отмечается уровень надежности, обеспечиваемый системой внешнего электроснабжения потребителя. Из этого следует, что штраф никак не связан ни с категорийностью электроприемников потребителя, ни с фактическими убытками потребителя из-за внезапных перерывов электроснабжения, тем более указанная норма не соответствует электроприемникам 1-й категории, последствия перерывов электроснабжения которых вообще могут быть не восполнимы. Добавим к этому, что кроме размера штрафа до сих пор отсутствует порядок его реализации, как то: способ фиксации недоотпущенной электроэнергии, порядок взыскания штрафа и т. п. Добавим, что указанный размер штрафа вряд ли в большинстве случаев соответствует реальным убыткам потребителей при отказах их электроснабжения. Можно утверждать, что размер штрафа имеет чисто символическое значение, а запись в договоре об ответственности энергоснабжающей организации за надежность электроснабжения имеет формальный характер. Возникающие при внезапных перерывах электроснабжения убытки потребителей покрываются за счет государства. Отмеченные выше оправдания обоядного ужесточения требований к надежности электроснабжения следует расценивать как стремление энергоснабжающих организаций и потребителей в той или иной мере перестраховать свою ответственность за счет того же государства.

В условиях рыночных отношений материальная ответственность энергоснабжающих организаций за нарушения надежности электроснабжения потребителей неизбежна и должна соответствовать фактическим убыткам последних при возникновении внезапного нарушения их электроснабжения по вине энергоснабжающей организации.

Первым узаконенным примером такой ответственности служат «Правила предоставления коммунальных услуг», утвержденных постановлением правительства РФ от 26 сентября 1994 г. № 1099, согласно которым энергоснабжающая организация обязана оплачивать неустойку коммунальным потребителям в случаях превышения перерывов электроснабжения по сравнению с требованиями ПУЭ и отклонения параметров качества электроэнергии от стандартных значений. Рассматриваемое постановление касается коммунальных потребителей, к

которым отнесены только жилые дома.

Под давлением потребителей частного сектора следует ожидать появление подобных постановлений, связанных с электроснабжением других потребителей.

В порядке предварительных предложений по действительной ответственности за надежность электроснабжения, включая ее распределение между электроснабжающей организацией и потребителями, с учетом особенностей формирования и функционирования как внешних систем электроснабжения потребителей, так и особенностей источников питания энергосистемы, может быть отмечено следующее.

Прежде всего введем условное понятие гарантированной надежности электроснабжения с изменением принятого в ПУЭ определения независимого источника питания. Если с точки зрения указанного понятия оценить действующие требования ПУЭ по формированию центров питания в предельном случае, когда в качестве независимого источника могут рассматриваться секции РУ вторичного напряжения, то можно заключить, что энергосистемы при строгом подходе могут гарантировать независимость секций РУ только с учетом одного нарушения нормального режима питания. Однако опыт функционирования центров питания показывает, что по причинам эксплуатационного характера, недостаточного качества электрооборудования и др. встречаются случаи наложения режимов центра питания с неизбежными в связи с этим перерывами электроснабжения потребителей.

Если учесть малочисленность, как правило, приемников высшей категории надежности и их малую нагрузку по сравнению с мощностью центров питания, то следует признать, что дальнейшее повышение надежности центров питания, по сравнению с указанным способом формирования, путем усложнения вышестоящих элементов энергосистем представляется нецелесообразным. В результате может быть сделан вывод, что по указанным причинам центры питания с точки зрения обеспечения гарантированного электроснабжения потребителей независимо от способа их формирования должны расцениваться как один независимый источник питания.

Дополнительно к указанному, также во изменение ПУЭ, предлагается электроприемники разбить на две группы. В первую группу включить приемники, внезапный перерыв электроснабжения которых приводит к гибели людей или к трудно восполнимому ущербу. Ко второй группе отнести электроприемники, последствия перерывов электроснабжения которых допускают материальную оценку и которые могут быть адекватно компенсированы, а также приемники, последствия

перерывов которых не поддаются материальной оценке, но требуют регламентации допустимого времени перерыва электроснабжения.

Надежность перечисленных групп приемников и ответственность за надежность их электроснабжения предлагается обеспечивать следующим образом.

Электроснабжение приемников первой группы необходимо выполнять с учетом гарантированного электроснабжения, имея в виду их питание от двух независимых источников. При этом в качестве второго источника должен использоваться собственный автономный источник потребителя. В случае возникновения нарушения электроснабжения со стороны источника энергосистемы потребитель должен обеспечивать питание рассматриваемых приемников от собственного автономного источника. Только при соблюдении указанных условий можно гарантировать требуемую надежность электроснабжения приемников первой группы. Отметим, что автономные источники широко используются в практике зарубежных стран, где производятся многочисленные виды таких источников. Ряд устройств имеет двойное назначение: еще и поддержание необходимого качества напряжения.

Материальная ответственность энергоснабжающей организации должна касаться только приемников второй группы: имеется в виду компенсация убытков потребителей из-за внезапных отказов электроснабжения по вине электроснабжающей организации. Эта материальная ответственность будет стимулировать выполнение энергосистемами необходимых мероприятий по поддержанию надежности центров питания на рациональном уровне. Эти же мероприятия одновременно повлияют и на надежность электроснабжения приемников первой группы.

Указанное разграничение ответственности за надежность электроснабжения потребителей следует из общего разграничения собственности, характерной для рыночных отношений. Естественно, что классификация конкретных электроприемников по требованиям к надежности их электроснабжения должна производиться не путем их регламентации, а непосредственно их владельцем, т. е. потребителями, которые исходя из особенностей своего технологического процесса должны оценить целесообразность установки и использования при необходимости собственного автономного источника, сравнивая с возможной компенсацией ущерба при нарушении электроснабжения.

Выбор надежности электроснабжения самим потребителем и будет соответствовать упомянутому в ряде публикаций «заказу надежности», при этом никакой «дифференциации тарифов в зависимости от надежности» не потребуется. Рассматриваемые разграничения и предложения по

их реализации необходимо закрепить в соответствующих правилах и нормах, утвержденных на необходимом уровне.

Схемные решения при оформлении внешних систем электроснабжения потребителей с учетом указанных исходных положений в соответствии с мировой практикой должны базироваться на критерии «*n-1*»\*, т. е. объем резервирования в системе электроснабжения определяется только условиями однократного нарушения нормального режима.

Не исключено отступление от данного принципа при наличии обоснования и по здравому смыслу. Например, электроснабжение потребителей большой мощности, которые в целом могут относиться по надежности к первой группе электроприемников, может предусматриваться от двух разнесенных центров питания энергосистемы без установки автономного источника. При этом необходимо согласие электроснабжающей организации с последующим закреплением условий электроснабжения в двухстороннем договоре.

Дополнительно к изложенному возникает проблема компенсации электроснабжающими организациями убытков потребителей из-за отказов их электроснабжения. Наиболее приемлемым решением представляется создание для этой цели специализированного страхового фонда надежности с участием заинтересованных потребителей и энергоснабжающей организации, с правом последней на использование определенной части фонда, остающейся после компенсации страховых возмещений текущего года и других установленных отчислений, связанных с деятельностью фонда.

Страховой фонд позволит уравновесить материальные взаимоотношения потребителей и энергоснабжающей организации с точки зрения обеспечения требуемой надежности электроснабжения, тем самым установить оптимальные условия формирования систем электроснабжения.

Размеры страховых взносов и возмещения, для участия энергоснабжающей организации, другие особенности реализации страхового фонда потребуют соответствующей разработки и регламентации в установленном порядке. Они могутходить из размера убытка потребителя, определяемого непосредственным калькулированием при каждом случае нарушения электроснабжения, удельных потерь, относимых к недоотпущеной электроэнергии, и т. п.

Закрепление всех условий энергоснабжения необходимо производить в двухстороннем договоре на пользование электроэнергией между потребителями и энергоснабжающей организацией с указанием фактической ответственности сторон за

\*Прим. ред. Вопрос о внедрении в практику российских электрических сетей принципа «*n-1*» требует дополнительного обсуждения.

надежность электроснабжения и обязательств по ее страхованию. При этом точка разграничения ответственности должна совпадать с точкой установки учета, к которой, как известно, привязывается размер тарифа.

Разрешение споров, которые могут возникнуть между потребителями и энергоснабжающей организацией в процессе реализации договорных отношений, должно производиться арбитражным судом.

Использование рассматриваемых предложений для новых систем электроснабжения может быть начато после разработки и издания соответствующей методической и нормативной документации. Ее реализация для действующих установок потребует определенного времени. С этой целью электроснабжающая организация при каждом перезаключении договора на пользование электроэнергией должна фиксировать фактический уровень надежности и ответственность электроснабжающей организации исходя из новой регламентации. При этом переходные трудности могут возникнуть только для потребителя с приемниками 1-й категории (по ПУЭ), в то время как для приемников 2-й и 3-й категорий (по ПУЭ) возможные трудности могут разрешаться за счет участия потребителя в страховом фонде надежности.

В настоящее время реализация внешних систем электроснабжения потребителей выполняется силами и средствами последних с учетом технических условий энергоснабжающей организации. При этом, что особенно касается порядка развития распределительных сетей, выполненные потребителями электросетевые объекты передаются на баланс электроснабжающей организации. В рыночных условиях понятие передачи с баланса на баланс отсутствует. По этой причине необходимые работы по усилению сетей в связи с присоединением дополнительной нагрузки потребителей должны выполняться энергоснабжающей организацией или стоимость их выполнения должна тем или иным способом компенсироваться потребителю энергоснабжающей организацией. Целесообразное решение этой проблемы возможно на основе лизинга, т. е. выкупа энергоснабжающей организацией новых элементов сетей путем их краткосрочной аренды у потребителя.

{26.04.95}

*Автор: Козлов Владимир Алексеевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1939 г. В 1961 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Методика технико-экономических расчетов городских распределительных замечаний». Начальник службы Кабельной сети АО Ленэнерго.*

# Электромагнитные силы, действующие на элементы магнитного сердечника и провода с токами в области паза электрической машины

ИВАНОВ-СМОЛЕНСКИЙ А.В., АБРАМКИН Ю.В., АВАНЕСОВ М.А., ХУАН МОРЕ ОУЧИ

Для открытого паза прямоугольной формы при допущении о бесконечно большой магнитной проницаемости сердечников статора и ротора электрической машины и некоторых других допущениях аналитически определяются радиальные и тангенциальные составляющие электромагнитных сил, действующих в магнитном поле на элементы сердечника и провода с токами в области паза. Предполагается, что собственное (нечетное) и внешнее (четное) магнитные поля в области паза в заданное мгновение установленного или переходного процесса заранее рассчитаны. Дается оценка влияния насыщения зубцов на значение электромагнитных сил.

**Ключевые слова:** электрические машины, электромагнитные силы, магнитный сердечник, провода, расчет

**Введение.** Электромагнитные силы, действующие на элементы активных частей электрической машины, могут вызывать существенные механические напряжения и вибрации, которые необходимо учитывать при проектировании. Расчетам этих электромагнитных сил и, в частности, расчетам электромагнитных сил (ЭМС), действующих на область паза электрической машины, посвящено много опубликованных работ. С наибольшей полнотой ЭМС, действующие на область паза электрической машины, рассмотрены в [1, 3]. Однако в этих работах анализируются главным образом радиальные составляющие ЭМС, действующих на область паза. Формулы для определения тангенциальных составляющих ЭМС предложены только для случая, когда в пазу имеется сосредоточенный ток на оси паза.

Предложенными формулами нельзя воспользоваться для определения тангенциальных сил в области реального паза, в котором располагаются провода с равномерно распределенными по их сечению токами.

В известных нам публикациях отсутствуют комплексное рассмотрение всех электромагнитных сил, действующих на элементы паза, а также оценка влияния насыщения магнитного сердечника на эти силы.

В статье делается попытка восполнить указанные проблемы в анализе ЭМС в области паза электрической машины.

Рассматривается паз прямоугольной формы, в котором располагаются провода с токами. При допущении о бесконечно большой магнитной проницаемости сердечников статора и ротора ана-

*The paper considers an analytical method for calculating radial and tangential components of electromagnetic forces acting on magnetic core elements and current conductors in the slot area of an electrical machine. The following assumptions — an open rectangular slot and an infinite permeability of stator and rotor cores — are accepted. It is supposed that the slot's own magnetic field (so called the odd field) and the slot's external magnetic field (so called the even field) in the time instant specified of steady-state or transient conditions have been calculated beforehand. The influence of the teeth saturation on the value of electromagnetic forces is evaluated.*

**Ключевые слова:** электрические машины, электромагнитные силы, магнитный сердечник, провода, расчет

литически рассчитывается по [7] магнитное поле в области паза, образованное собственными мгновенными токами в проводах данного паза и внешними мгновенными токами в проводах всех прочих пазов магнитных сердечников статора и ротора. Аналитически определяются радиальные и тангенциальные составляющие ЭМС, действующих в магнитном поле на элементы сердечника и провода с токами в области данного паза. Оценивается влияние насыщения зубцов магнитного сердечника на электромагнитные силы.

**Постановка задачи определения электромагнитных сил в области паза.** Считаются заданными:

размеры зубцов и пазов 1-го и 2-го магнитных сердечников и зазора между ними;

размеры проводов (катушечных сторон), расположенных в верхнем и нижнем слоях рассматриваемого паза 1-го сердечника, имеющего прямоугольную форму;

размеры, определяющие положение этих проводов по высоте паза;

мгновенные токи в этих проводах ( $i_b$  и  $i_h$ );

средняя индукция внешнего магнитного поля в зазоре на ширине зубцового деления, включающего рассматриваемый паз (внешнее магнитное поле образуется мгновенными токами в проводах всех пазов 1-го и 2-го сердечников за исключением рассматриваемого).

Требуется определить:

радиальные и тангенциальные составляющие электромагнитной силы, действующей в магнитном поле на провода с токами  $i_b$  и  $i_h$ , расположенные в рассматриваемом пазу;

радиальные и тангенциальные электромагнит-

ные силы, действующие в магнитном поле на элементы магнитного сердечника, расположенные в области паза;

результатирующие радиальные и тангенциальные электромагнитные силы, действующие на область рассматриваемого паза.

**Основные допущения.** Предполагается для определенности, что ЭМС рассчитываются в области паза 1-го сердечника при заданных токах  $i_b$  и  $i_h$  в пазу и средней индукции на зубцовом делении паза  $B_{\delta cp}$ . При расчете поля и ЭМС в области паза принимаются такие же допущения, как и в [7];

магнитная проницаемость 1-го и 2-го сердечников считается бесконечно большой, зубчатая поверхность 2-го сердечника заменяется гладкой поверхностью (вместо зазора  $\delta_0$  между сердечниками вводится зазор  $\delta = k_{\delta 2} \delta_0$ , где  $k_{\delta 2}$  — коэффициент зазора, учитывающий влияние зубчатости второго сердечника);

в области всех пазов за исключением рассматриваемого зубчатая поверхность 1-го сердечника заменяется гладкой (такая замена приводит к пренебрежимо малым искажениям поля в области рассматриваемого паза);

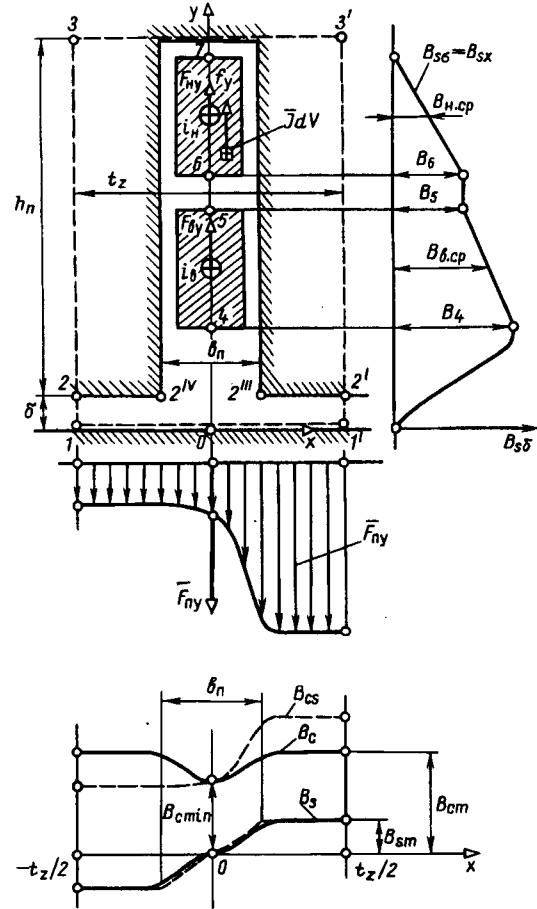
кольцевой зазор между эквивалентными гладкими поверхностями 1-го и 2-го сердечников заменяется бесконечно протяженным полосовым зазором с той же толщиной  $\delta$ .

После введения этих допущений область паза приобретает форму прямоугольной фигуры 133' 1' (рис. 1), внутри которой размещаются две зоны — магнитная и немагнитная. Немагнитная зона включает сам паз с токами  $i_b$  и  $i_h$  и зазор между сердечниками на протяжении зубцовового деления паза. Магнитная зона включает элементы зубцов 1-го сердечника в пределах зубцовового деления. Граница между магнитной и немагнитной зонами включает несколько характерных участков: участки, отделяющие зубцы от зазора; участки, отделяющие зубцы от паза; участок, отделяющий ярмо 1-го сердечника от паза.

**Метод расчета электромагнитных сил в магнитном поле.** Электромагнитные силы в магнитном поле рассчитываются с помощью формул, предложенных Максвеллом и вытекающих из его уравнений для электромагнитного поля [1]. ЭМС  $F$ , действующая на объем  $V$ , выделенный поверхностью  $S$  в магнитном поле, может быть рассчитана двумя способами.

В первом она выражается в виде суммы сил, действующих на малые элементы объема и малые элементы поверхностей разрыва магнитной проницаемости в объеме  $V$ :

$$\bar{F} = \int_V \bar{f} dV + \int_{S_{ab}} \bar{f}_s dS, \quad (1)$$



— вектор натяжения на элементе поверхности  $S$  (внешней по отношению к объему  $V$ ) с нормалью  $\bar{n}$  и тангенциалю  $\bar{\tau}$ ;  $B_n = \bar{n} B$ ,  $B_\tau = B \bar{\tau}$  — нормальная и тангенциальная составляющие вектора индукции на элементе поверхности  $S$  с нормалью  $\bar{n}$  и тангенциалю  $\bar{\tau}$ .

**Радиальная ЭМС, действующая на область паза.** Радиальная сила, действующая на область паза  $1233' 2' 1'$ , определяется на единицу его длины в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа (рис. 1).

При принятом допущении о замене кольцевого зазора полосовым радиальное направление совпадает с направлением по оси  $y$ , тангенциальное — с направлением по оси  $x$ . Поэтому в выбранной системе координат радиальная сила, действующая на область паза  $1233' 2' 1'$  направлена по оси  $y$  и обозначена  $\bar{F}_{\text{п}y}$ .

Выразив эту силу по первому способу — по формуле (1), можно было бы убедиться, что она приложена к участкам  $22^{IV}$  и  $2^{III} 2'$  поверхности разрыва магнитной проницаемости и направлена по  $(-y)$ , т. е. в сторону зазора, а ее значение пропорционально квадрату индукции на элементах этих участков. Однако индукцию магнитного поля на участках  $22^{IV}$  и  $2^{III} 2'$  определить затруднительно; проще определить силу  $\bar{F}_{\text{п}y}$  по второму способу через натяжения — по формуле (2). Эта формула должна быть применена к поверхности  $S \rightarrow 1233' 2' 1'$ , охватывающей объем области паза. Причем во внимание могут быть приняты только те участки поверхности  $S$ , на которых имеются натяжения  $\bar{T}_n$ , направленные по оси  $y$  и равные  $T_{ny} \bar{q}_y$ , где  $\bar{q}_y$  — единичный вектор по оси  $y$ .

Напомним, что мы приняли магнитную проницаемость сердечников  $\mu_c = \infty$  и предположим, что на границах области поля (при  $x = \pm t_z/2$ ) и четное, и нечетное поля в зазоре [7, форм. (10), (15)] становятся равномерными, составляющие их индукции по оси  $x$  ( $B_{cx}$  и  $B_{sx}$ ) обращаются в нуль, а составляющие по оси  $y$  ( $B_{cy}$  и  $B_{sy}$ ) достигают максимальных (по абсолютной величине) значений. Поэтому натяжения на участках  $23$ ,  $33'$  и  $3' 2'$ , расположенных внутри сердечников равны нулю, а натяжения на участках  $12$  и  $1' 2'$  направлены по оси  $x$  ( $\bar{T}_n = T_{nx} \bar{q}_x$ ) и в создании радиальной силы  $\bar{F}_{\text{п}y} = F_{\text{п}y} \bar{q}_y$  принимают участие только натяжения на участке  $11'$  (на поверхности гладкого 2-го сердечника), где индукции четного и нечетного полей и соответствующие им натяжения направлены по оси  $y$  ( $B_c = B_{cy} \bar{q}_y$ ,  $B_s = B_{sy} \bar{q}_y$ ,  $\bar{T}_n = T_{ny} \bar{q}_y$ ):

$$\bar{F}_{\text{п}y} = \bar{q}_y F_{\text{п}y} = \int_{S_{11'}} \bar{T}_n dS = \int_{-t_z/2}^{t_z/2} \bar{T}_n dx, \quad (3)$$

где  $\bar{T}_n = \bar{n} B_{cs}^2 / (2\mu_0)$  — вектор натяжения на поверхности  $11'$  ( $y=0$ );  $B_{cs}$  — индукция результирующего магнитного поля на поверхности  $11'$ , складывающегося из четного и нечетного полей;  $\bar{n} = -\bar{q}_y$  — внешняя нормаль к поверхности  $11'$ .

Внешнее (четное) и собственное (нечетное) поля определены нами в [7] в правой части области паза (при  $x \geq 0$ ). В этой зоне на поверхности  $01'$  ( $y=0$ ), в точке с координатой  $x \geq 0$  индукции по [7, форм. (10), (15)] имеют значения:

$$B_{c\text{пп}} = B_{cy}(x) = B_c; \quad B_{s\text{пп}} = B_{sy}(x) = B_s$$

и в сумме дают результирующую индукцию

$$B_{cs\text{пп}} = B_{c\text{пп}} + B_{s\text{пп}} = B_c + B_s.$$

В точке с координатой  $(-x)$ , слева от начала координат индукции четного и нечетного полей имеют в силу симметрии значения:

$$B_{c\text{сл}} = B_{cy}(-x) = B_{cy}(x) = B_c;$$

$$B_{s\text{сл}} = B_{sy}(-x) = -B_{sy}(x) = -B_s$$

и в сумме дают результирующую индукцию

$$B_{cs\text{сл}} = B_{c\text{сл}} + B_{s\text{сл}} = B_c - B_s.$$

Выразив таким образом результирующую индукцию справа и слева от начала координат через индукцию четного и нечетного полей при  $x \geq 0$ , можно по (3) выразить через эти индукции и радиальную силу, действующую на область паза:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{\text{п}y} = \bar{q}_y F_{\text{п}y} = -\frac{\bar{q}_y}{2\mu_0} \int_{-t_z/2}^{t_z/2} B_{cs}^2 dx = -\frac{\bar{q}_y}{2\mu_0} \int_0^{t_z/2} (B_{c\text{сл}}^2 + B_{s\text{сл}}^2) dx = \\ = -\frac{\bar{q}_y}{2\mu_0} \left[ 2 \int_0^{t_z/2} B_c^2 dx + 2 \int_0^{t_z/2} B_s^2 dx \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Интегралы, которые входят в (4), могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} 2 \int_0^{t_z/2} B_c^2 dx &= B_{c\exists}^2 t_z; \\ 2 \int_0^{t_z/2} B_s^2 dx &= B_{s\exists}^2 t_z, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$B_{c\exists} = \sqrt{\frac{2}{t_z} \int_0^{t_z/2} B_c^2 dx}; \quad B_{s\exists} = \sqrt{\frac{2}{t_z} \int_0^{t_z/2} B_s^2 dx}$$

— среднеквадратичные (эффективные) значения

индукций четного и нечетного полей на зубцовом делении.

Сначала определим  $B_{c3}^2$  и  $B_{s3}$ . Поступая так же, как при выводе формулы [7, форм. (19)] для  $B_{\delta cp}$ , представим  $B_c = B_{cm} - B_\Delta$ , где  $B_\Delta = B_{cm} - B_c$ , тогда

$$\begin{aligned} B_{c3}^2 &= \frac{2}{t_z} \int_0^{t_z/2} B_c^2 dx = \frac{2}{t_z} \int_0^{t_z/2} (B_{cm} - B_\Delta)^2 dx = \\ &= \frac{2}{t_z} \int_0^{t_z/2} B_{cm}^2 dx - 2B_{cm} \frac{2}{t_z} \int_0^{t_z/2} B_\Delta dx + \frac{2}{t_z} \int_0^{t_z/2} B_\Delta^2 dx. \end{aligned}$$

В этом выражении, как видно из [7, форм. (18)],

$$\frac{2}{t_z} \int_0^{t_z/2} B_\Delta dx = \frac{2}{t_z} \int_0^\infty B_\Delta dx = B_{\Delta cp} = B_{cm} \delta \gamma / t_z.$$

Последний член этого выражения представляет собой квадрат среднеквадратичного значения  $B_\Delta$ , т.е.

$$\frac{2}{t_z} \int_0^{t_z/2} B_\Delta^2 dx = \frac{2}{t_z} \int_0^\infty B_\Delta^2 dx = B_{\Delta3}^2.$$

Причем из численных расчетов  $B_{\Delta3}$  и  $B_{\Delta cp}$  в широком диапазоне отношений  $\delta/b$  следует

$$B_{\Delta3} = 1,22 B_{\Delta cp} = 1,22 B_{cm} \delta \gamma / t_z.$$

Учитывая сказанное, получим для среднеквадратичного значения  $B_c$  следующую формулу:

$$B_{c3} = |B_{cm}| \sqrt{1 - 2g + 1,5g^2}, \quad (6)$$

где  $|B_{cm}| = k_{\delta1} |B_{\delta cp}|$  и  $k_{\delta1}$  — по [7, форм. (19)];  $g = \delta \gamma / t_z = (k_{\delta1} - 1) / k_{\delta1}$  и  $\gamma$  — по [7, форм. (18), (19)].

При  $g = (k_{\delta1} - 1) / k_{\delta1} \ll 1$  формула (6) существенно упрощается и приобретает вид:

$$\begin{aligned} B_{c3} &= |B_{cm}| \sqrt{1 - 2g + 1,5g^2} = |B_{cm}| (1 - g) = \frac{|B_{cm}|}{k_{\delta1}} = \\ &= |B_{\delta cp}|. \end{aligned} \quad (6a)$$

При определении  $B_{s3}^2$  и  $B_{s3}$  вместо действительного распределения  $B_s$  на зубцовом делении введем кусочно-линейную аппроксимацию этого распределения, показанную на рис. 1 пунктиром: при  $0 < x < b$ ;  $B_s = B_{sm}$  при  $x > b$ . Тогда

$$\begin{aligned} B_{s3}^2 \frac{2}{t_z} \int_0^{t_z/2} B_s^2 dx &= \frac{2}{t_z} \int_0^b B_{sm}^2 (x/b)^2 dx + \frac{2}{t_z} \int_b^{t_z/2} B_{sm}^2 dx = \\ &= B_{sm}^2 (1 - 1,33 b / t_z), \end{aligned}$$

следовательно,

$$B_{s3} = |B_{sm}| \sqrt{1 - 1,33 b / t_z}, \quad (7)$$

где  $|B_{sm}| = \frac{\mu_0 i_{\text{вн}}}{2\delta}$  — по [7, форм. (11)].

Вводя  $B_{c3}$  и  $B_{s3}$  по (6), (7) в (4) и (5), получим для радиальной силы, действующей на единицу длины области паза, следующую формулу:

$$\bar{F}_{\text{пв}} = \bar{q}_v F_{\text{пв}} = -\bar{q}_v (B_{c3}^2 + B_{s3}^2) t_z / 2\mu_0. \quad (8)$$

**Радиальные ЭМС, действующие на токи в пазу.**

Эти силы возникают от взаимодействия токов  $i_{\text{в}}$  и  $i_{\text{н}}$  с образованным ими собственным (четным) магнитным полем (рис. 1). Они уравновешены внутри области паза противоположно направленными силами, действующими на магнитный сердечник, поэтому их нельзя найти по второму способу через натяжения на поверхности  $S$ , охватывающей область паза. Они могут быть найдены по первому способу через объемную плотность ЭМС по формуле (1).

Предварительно найдем плотности токов в верхнем и нижнем проводах:

$$J_{\text{в}} = i_{\text{в}} / (b_{\text{в}} h_{\text{в}}); \quad J_{\text{н}} = i_{\text{н}} / (b_{\text{н}} h_{\text{н}}),$$

где  $b_{\text{в}} = b_{\text{н}}$  — ширина верхнего и нижнего проводов, а также средние индукции собственного поля этих токов в областях верхнего и нижнего проводов (см. [7, форм. (1), (3) и рис. 1]):

$$\begin{aligned} B_{\text{в, cp}} &= \frac{1}{h_{\text{в}}} \int_{y_4}^{y_5} B_{\text{в}} dy = (B_4 + B_5) / 2 = \\ &= -\mu_0 (i_{\text{н}} + 0,5 i_{\text{в}}) / b_{\text{н}}; \end{aligned}$$

$$B_{\text{н, cp}} = \frac{1}{h_{\text{н}}} \int_{y_6}^{y_7} B_{\text{н}} dy = B_6 / 2 = -0,5 \mu_0 i_{\text{в}} / b_{\text{н}}.$$

Кроме того, запишем по (1) выражения для объемных плотностей ЭМС в верхнем и нижнем проводах:

$$\begin{aligned} \bar{f}_{\text{в}} &= [\bar{J} \times \bar{B}_{\text{в}}] = -\bar{q}_v J_{\text{в}} B_{\text{в}}; \\ \bar{f}_{\text{н}} &= [\bar{J} \times \bar{B}_{\text{н}}] = -\bar{q}_v J_{\text{н}} B_{\text{н}}. \end{aligned}$$

Используя полученные выражения, найдем следующие формулы для радиальных электромагнитных сил, действующих на единицу длины токов в пазу:

$$\bar{F}_{\text{вв}} = \bar{q}_v F_{\text{вв}} = \int_{V_{\text{в}}} \bar{f}_{\text{в}} dV = b_{\text{в}} \int_{y_4}^{y_5} \bar{f}_{\text{в}} dy = \bar{q}_v \mu_0 i_{\text{в}} (i_{\text{н}} + 0,5 i_{\text{в}}) / b_{\text{н}};$$

$$\bar{F}_{\text{нн}} = \bar{q}_v F_{\text{нн}} = \int_{V_{\text{н}}} \bar{f}_{\text{н}} dV = b_{\text{н}} \int_{y_6}^{y_7} \bar{f}_{\text{н}} dy = \bar{q}_v 0,5 \mu_0 i_{\text{в}}^2 / b_{\text{н}}.$$

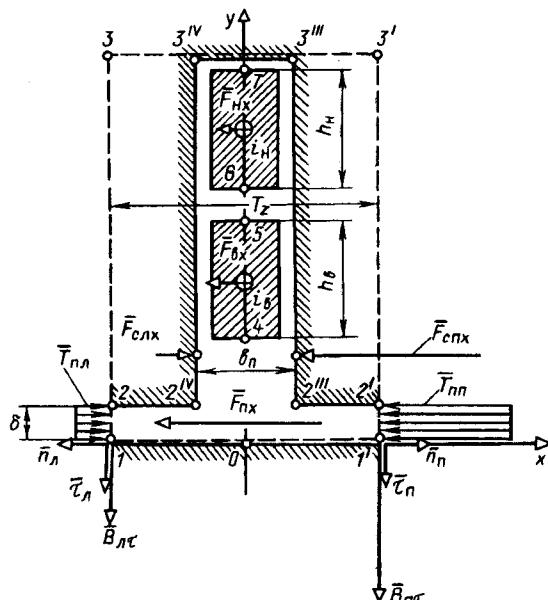


Рис. 2

Тангенциальная ЭМС, действующая на область паза. Тангенциальная ЭМС  $F_{nx}$ , действующая на единицу длины области паза  $1233' 2' \frac{1}{l'}$ , складывается из тангенциальных сил  $F_{bx}$  и  $F_{nx}$ , приложенных непосредственно к проводам с токами  $i_b$  и  $i_n$ , и из тангенциальной силы  $F_{cx} = F_{cbl} + F_{cpl}$ , действующей на элементы магнитного сердечника в области паза (рис. 2).

Воспользовавшись первым способом определения ЭМС, можно было бы определить силы  $F_{bx}$ ,  $F_{nx}$ ,  $F_{cpx}$ ,  $F_{cpx}$  по формуле (1) путем интегрирования элементарных объемных  $f dV$  или поверхностных  $f_s dS$  сил в объеме области паза. Затем, суммируя эти силы, найти результирующую тангенциальную силу  $F_{nx}$ , действующую на область паза, по формуле

$$\bar{F}_{\text{px}} = \bar{F}_{\text{bx}} + \bar{F}_{\text{hx}} + \bar{F}_{\text{cx}}, \quad (10)$$

где  $\bar{F}_{cx} = \bar{F}_{cpx} + \bar{F}_{clx}$  — результирующая тангенциальная сила, действующая на левую и правую боковые поверхности паза;  $\bar{F}_{cpx}$  ( $\bar{F}_{clx}$ ) — тангенциальная сила, действующая на правую 2<sup>III</sup> 3<sup>III</sup> (левую 2<sup>IV</sup> 3<sup>IV</sup>) границу паза, отделяющую немагнитный паз от магнитного сердечника, обладающего бесконечно большой магнитной проницаемостью.

Однако такой путь определения  $F_{nx}$  не может быть реализован в аналитической форме из-за непреодолимых трудностей в определении сил  $F_{cpx}$  и  $F_{cpx}$ . Поэтому воспользуемся для определения  $F_{nx}$  вторым из возможных способов по формуле (2). Применим эту формулу к поверхности  $S \rightarrow 1233' 2' 1'$ , охватывающей объем паза. Как мы выяснили, рассматривая радиальную ЭМС, на-

тяжения, направленные тангенциаль но (т. е. по оси  $x$ ), имеются только на участках  $12$  и  $1'2'$ , расположенных в области зазора на расстояниях  $\pm(t_z/2)$  от оси паза. Поэтому только эти участки поверхности  $S$  должны быть приняты во внимание при определении тангенциальной силы, действующей на область паза, по формуле (2). Как уже было выявлено, участки  $12$  и  $1'2'$  находятся на таком удалении от оси паза, что нечетное и четное поля становятся равномерными, а их индукции по [7, форм. (11), (18)] достигают максимальных (по абсолютной величине) значений и направлены по оси  $u$  (т. е. тангенциаль но по отношению к поверхностям  $12$  и  $1'2'$ ):

$$B_{sm} = B_{sy} = -i_{\text{BH}} \mu_0 / (2\delta); \quad (11)$$

$$B_{cm} = B_{cy} = -\mu_0 \psi_c / \delta = k_{\delta 1} B_{\delta \text{cp}}.$$

Имея в виду, что индукции четного и нечетного полей на участке  $1' 2'$  («справа» от оси паза) суммируются, а на участке  $12$  («слева» от оси паза) вычтываются, можно определить по (2) натяжения на этих участках:

$$\begin{aligned}\bar{T}_{n\pi} &= -0,5 B_{\pi\pi}^2 \bar{n}_\pi / \mu_0 = 0,5 B_{\pi\pi}^2 \bar{q}_x / \mu_0; \\ \bar{T}_{n\eta} &= -0,5 B_{\pi\pi}^2 \bar{n}_\eta / \mu_0 = -0,5 B_{\pi\pi}^2 \bar{q}_x / \mu_0,\end{aligned}\quad (12)$$

где  $B_{\Pi\tau} = B_{cm} + B_{sm}$ ;  $B_{J\tau} = B_{cm} - B_{sm}$ .

Через эти напряжения легко выразить тангенциальную силу  $F_{nx}$ , действующую на область паза,

$$\bar{F}_{nx} = \int_s \bar{T}_n dx = \int_{S_{12}} \bar{T}_{n\pi} dS + \int_{S_{1'2'}} \bar{T}_{n\pi} dS = \int_0^\delta \bar{T}_{n\pi} dy + \int_0^\delta \bar{T}_{n\pi} dy.$$

Учитывая (12), получим формулу для тангенциальной силы, действующей на область паза, в которую входят максимальные значения индукций четного и нечетного полей:

$$\bar{F}_{nx} = \bar{q}_x F_{nx} = \frac{0,5 \bar{q}_x}{\mu_0} \int_0^{\delta} (B_{lt}^2 - B_{nt}^2) dy = -2 B_{cm} B_{sm} \frac{\bar{q}_x}{\mu_0}.$$

Выражая индукции  $B_{cm}$  и  $B_{sm}$  по (11), получим формулу для тангенциальной силы, действующей на область паза; в которую входят исходные данные для расчета магнитного поля в этой области ( $i_{\text{вн}} = i_{\text{в}} + i_{\text{н}}$  и  $B_{\delta\text{ср}}$ ):

$$\bar{F}_{\text{nx}} = \bar{q}_x F_{\text{nx}} = i_{\text{BH}} B_{cm} \bar{q}_x = (i_{\text{B}} + i_{\text{H}}) B_{\delta \text{cp}} k_{\delta 1} \bar{q}_x, \quad (13)$$

где  $i_{\text{вн}}, i_{\text{в}}, i_{\text{н}}$  — полный ток в пазу и токи в верхнем и нижнем слоях паза, положительные направления которых показаны на рис. 2;  $B_{\delta\text{ср}}$  — средняя индукция внешнего (четного) поля в области паза, положительное направление для которой совпадает с направлением оси  $y$ .

Как видно из (13), на область паза действует тангенциальная сила  $\bar{F}_{\text{px}}$ , равная по значению и направлению силе, которая действовала бы на ток  $i_{\text{bh}} = i_{\text{b}} + i_{\text{h}}$ , если бы он был вынесен из паза и помещен в такую зону гладкого зазора, в которой внешнее (четное) поле становится равномерным, а его индукция достигает максимального (по абсолютной величине) значения  $B_{cm} = k_{\delta 1} B_{\delta \text{ср}}$ .

**Тангенциальные ЭМС, действующие на токи и на элементы магнитного сердечника в области паза.** Для определения тангенциальных сил  $F_{\text{bx}} = \bar{q}_x F_{\text{bx}}$  и  $F_{\text{hx}} = \bar{q}_x F_{\text{hx}}$ , приложенных непосредственно к проводам с токами  $i_{\text{b}}$  и  $i_{\text{h}}$  (рис. 2), можно воспользоваться формулами, специально выделенными для этой цели в приложении.

Обращаясь к формуле (П-II), найдем сначала тангенциальную силу  $F_{\text{bx}}$ , действующую на верхний провод с токами во внешнем поле со средней индукцией в зазоре  $B_{\delta \text{ср}}$ . Имея в виду, что верхний провод имеет высоту  $h_{\text{b}}$ , ширину  $2b_1$ , а координаты верха и низа этого провода имеют значения  $y_{\text{b}} = y_4$ ,  $y_{\text{h}} = y_5$  получим следующее выражение для этой силы:

$$\bar{F}_{\text{bx}} = \bar{q}_x F_{\text{bx}} = \bar{q}_x \frac{B_{cm} i_{\text{b}} k_{\text{ср}} \delta}{h_{\text{b}}} (A_5 - A_4). \quad (14)$$

В этом выражении функции  $A_5 = A_{\text{h}}$  и  $A_4 = A_{\text{b}}$  определяются по кривым рис. 7 или с помощью программы [7, приложение 2] при заданных значениях  $\delta/b$ ,  $y_5/b$ ,  $y_4/b$  (где  $b = b_{\text{н}}/2$ ). Индукция  $B_{cm} = B_{\delta \text{ср}} k_{\delta 1}$ , где  $k_{\delta 1}$  — коэффициент зазора для первого сердечника. Коэффициент  $k_{\text{ср}} = \sin \alpha / \alpha$ , где  $\alpha = \pi b_1 / (2b)$ ;  $b_1$  — половина ширины провода.

Аналогично определяется сила  $\bar{F}_{\text{hx}}$ , действующая на нижний провод с током  $i_{\text{h}}$ , с тем отличием, что координаты верха и низа этого провода имеют другие значения:  $y_{\text{b}} = y_6$ ,  $y_{\text{h}} = y_7$ .

Определяя функции  $A_{\text{h}} = A_7$  и  $A_8 = A_6$  при этих значениях  $y_{\text{b}} = y_6$  и  $y_{\text{h}} = y_7$ , получим следующее выражение для тангенциальной силы  $\bar{F}_{\text{hx}}$ :

$$\bar{F}_{\text{hx}} = \bar{q}_x F_{\text{hx}} = \bar{q}_x \frac{B_{cm} i_{\text{h}} k_{\text{ср}} \delta}{h_{\text{h}}} (A_7 - A_6), \quad (15)$$

где значения  $B_{cm} = k_{\delta 1} B_{\delta \text{ср}}$  и  $k_{\text{ср}}$  сохраняются такими же, как в (14).

Для определения результирующей тангенциальной силы  $\bar{F}_{\text{cx}} = \bar{q}_x F_{\text{cx}}$ , действующей на элементы магнитного сердечника в области паза, нужно вспомнить, что в соответствии с (10) сила  $\bar{F}_{\text{cx}}$ , суммируясь с силами  $\bar{F}_{\text{bx}}$  по (14) и  $\bar{F}_{\text{hx}}$  по (15), создает полную силу  $\bar{F}_{\text{px}}$  по (13), которая действует на всю область паза. Поэтому, исходя из (10) и определяя заранее  $\bar{F}_{\text{px}}$  по (13),  $\bar{F}_{\text{bx}}$  по (14) и  $\bar{F}_{\text{hx}}$  по (15), можно найти силу

$\bar{F}_{\text{cx}}$  по формуле

$$\bar{F}_{\text{cx}} = \bar{F}_{\text{px}} - \bar{F}_{\text{bx}} - \bar{F}_{\text{hx}}. \quad (16)$$

Поскольку сумма сил  $(\bar{F}_{\text{bx}} + \bar{F}_{\text{hx}})$ , приложенных непосредственно к токам  $i_{\text{b}}$  и  $i_{\text{h}}$ , весьма мала по сравнению с полной силой  $\bar{F}_{\text{px}}$ , действующей на всю область паза ( $|\bar{F}_{\text{bx}} + \bar{F}_{\text{hx}}| \ll |\bar{F}_{\text{px}}|$ ), сила  $\bar{F}_{\text{cx}}$ , приложенная к элементам магнитного сердечника в области паза, весьма близка к силе  $\bar{F}_{\text{px}}$  ( $\bar{F}_{\text{cx}} \approx \bar{F}_{\text{px}}$ ). Этот вывод подтверждается примером расчета ЭМС в области паза, приведенным в приложении.

**Влияние насыщения на ЭМС в области паза.** Найденные нами ЭМС в области паза определены при допущении о бесконечно большой магнитной проницаемости сердечников электрической машины. Как показывают численные расчеты магнитного поля и ЭМС в области паза, это допущение достаточно оправдано. Тем не менее полезно дать оценку тех дополнительных ЭМС в области паза, которые возникают из-за влияния насыщения зубцов сердечника. Проведенный анализ этого влияния выявил, что оно по-разному оказывается на различных составляющих ЭМС. При сохранении исходных данных для расчета ЭМС в области паза ( $i_{\text{h}}$ ,  $i_{\text{b}}$  и  $B_{\delta \text{ср}}$ ), которые были найдены в [7, приложение 1] на основании электромагнитного расчета машины в заданном режиме работы, насыщение зубцов сердечника не влияет на полную тангенциальную силу по (13), действующую на область паза [1]. Весьма незначительно влияет насыщение зубцов на радиальные силы по (9), действующие на провода с токами  $i_{\text{b}}$  и  $i_{\text{h}}$ . Поэтому мы ограничимся рассмотрением влияния насыщения только на полную радиальную силу по (8), действующую на область паза, и на тангенциальные силы по (14), (15), действующие на провода с токами  $i_{\text{b}}$  и  $i_{\text{h}}$ .

**Влияние насыщения на радиальную силу, действующую на область паза.** Радиальная сила  $\bar{F}_{\text{py}}$  по (8), действующая на область паза, была определена нами по второму способу — формуле (2) — путем интегрирования радиально направленных натяжений на поверхности 1233' 2' 1', охватывающей область паза (рис. 1). При допущении о бесконечно большой магнитной проницаемости сердечника радиально направленные натяжения (по оси  $y$ ) были только на участке 11' поверхности  $S$ , расположенным в зазоре. В насыщенной машине будем определять радиальную силу  $\bar{F}_{\text{py}}^h$ , действующую на область паза, также по второму способу. Поскольку теперь нужно учесть насыщение зубцов сердечника, границы области паза 23 и 2' 3' должны быть совмещены с осями зубцов сердечника, тогда область паза

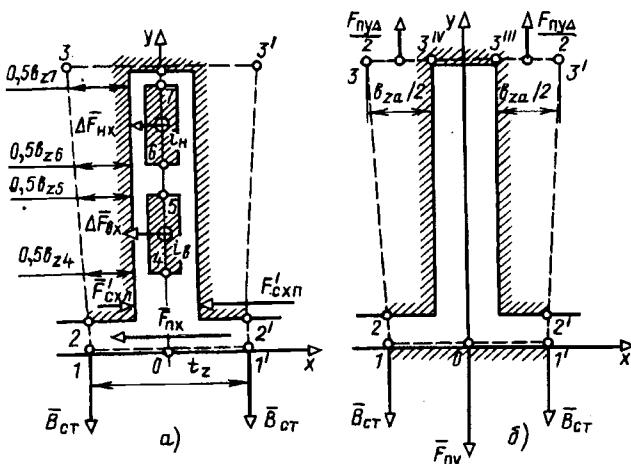


Рис. 3

приобретает вид, показанный на рис. 3,б. Если предположить, что насыщение проявляется только в области зубцов сердечника, а ярмо остается ненасыщенным (магнитная проницаемость в нем равна бесконечности), то в создании радиальной силы  $\bar{F}_{py}^h$ , действующей на область паза, кроме натяжений на участке 11', принимают участие натяжения на участках 33'' и 3' 3''' (на границе между ярмом и зубцом, где последний имеет ширину  $b_{za}$ ). При сохранении прежних исходных данных ( $i_b, i_h, B_{\delta cp}$ ) индукция и натяжение на участке 11' охватывающей поверхности 1233' 2' 1' остаются без изменения. Остается прежней и радиальная сила, действующая на участке 11'. Эта сила равна радиальной силе  $\bar{F}_{py}$  по (8), найденной без учета насыщения.

На участки 33'' и 3' 3''' действует дополнительная радиальная сила  $\bar{F}_{py\Delta}$ , связанная с насыщением зубцов:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{py\Delta} &= \bar{q}_y F_{py\Delta} = \int_{(33'')} \bar{T}_{n\Delta} dS + \int_{(3'3''')} \bar{T}_{n\Delta} dS = \\ &= \int_0^{b_{za}} \bar{T}_{n\Delta} dx = b_{za} \bar{T}_{n\Delta}. \end{aligned} \quad (17)$$

Натяжение  $\bar{T}_{n\Delta}$  в (17) выражается по (2) через индукцию  $B_{za}$  и магнитную проницаемость  $\mu = \mu_0 \mu_r$  в рассматриваемом сечении зубца

$$\bar{T}_{n\Delta} = \frac{B_{za}^2}{2\mu} \bar{n} = \frac{B_{za}^2}{2\mu} \bar{q}_y. \quad (18)$$

Под индукцией  $B_{za}$  в (18) понимаем среднюю индукцию в сечениях 33'' и 3' 3''', найденную с учетом ответвления потока в паз, и выражаем ее через среднюю индукцию внешнего поля в зазоре  $B_{\delta cp}$ . Сначала определим индукцию в зубце без учета ответвления потока в паз

$$B_{za0} = B_{\delta cp} t_z / (b_{za} k_c k_k),$$

где  $k_c$  — коэффициент заполнения для пакета сердечника;  $k_k = l_1' / (l_1' + b_b)$  — коэффициент заполнения для пакетного деления сердечника с радиальными каналами ( $l_1'$  — длина пакета;  $b_b$  — ширина канала).

По этой индукции с помощью характеристики намагничивания стали зубцов  $B_{z0} = f(H_z)$ , учитывая ответвление потока в паз при заданном коэффициенте  $k_p = b_p / b_{za}$ , определяем напряженность поля в зубце  $H_{za}$ . И, наконец, по напряженности  $H_{za}$  с помощью основной характеристики намагничивания стали зубца  $B_{za} = f(H_{za})$  находим индукцию в зубце с учетом ответвления потока в паз  $B_{za}$ , которой соответствует магнитная проницаемость

$$\mu = \mu_0 \mu_r = B_{za} / H_{za}.$$

Окончательно дополнительная радиальная сила, связанная с насыщением зубцов, определяется по формуле

$$\bar{F}_{py\Delta} = F_{py\Delta} \bar{q}_y = \frac{B_{za}^2}{2\mu} b_{za} \bar{q}_y. \quad (19)$$

Полная радиальная сила  $\bar{F}_{py}^h$ , действующая на единицу длины области паза в насыщенной машине, складывается из сил  $\bar{F}_{py}$  по (8) и  $\bar{F}_{py\Delta}$  по (19):

$$\bar{F}_{py}^h = \bar{F}_{py} + \bar{F}_{py\Delta} = -\bar{q}_y (|\bar{F}_{py}| - |\bar{F}_{py\Delta}|). \quad (20)$$

За счет появления дополнительной силы  $\bar{F}_{py\Delta}$ , направленной в противоположную сторону по отношению к силе  $\bar{F}_{py}$ , радиальная сила в насыщенной машине несколько уменьшается.

*Влияние насыщения на тангенциальную силу, действующую на провода с токами  $i_b$  и  $i_h$ .* Тангенциальные силы  $\bar{F}_{bx}$  по (14) и  $\bar{F}_{hx}$  по (15), действующие на провода с токами  $i_b$  и  $i_h$  во внешнем магнитном поле, были определены нами для тех индукций внешнего поля в месте расположения этих проводов, которые были найдены при бесконечно большой магнитной проницаемости зубцов сердечников.

При насыщении зубцов магнитная проницаемость становится конечной и часть магнитного потока вытесняется из зубцов в паз. При той же средней индукции в зазоре в области паза  $B_{\delta cp}$  (и, следовательно, том же магнитном потоке на зубцовом делении  $\Phi_z = B_{\delta cp} t_z$ ) это приводит к некоторому увеличению индукции в зоне паза.

В сечении зубца на расстоянии  $y_k$  от начала координат, где зубец имеет ширину  $b_{zk}$  (на рис. 3 показаны сечения при  $k \in 4, 5, 6, 7$ ) индукция внешнего поля в пазу увеличивается на величину  $B_{ck}$ , которая рассчитывается следующим образом. Определяется индукция в этом сечении зубца

без учета ответвления потока в паз

$$B_{zk0} = |B_{\delta cp}| t_z / (b_{zk} k_c k_k).$$

По этой индукции с помощью характеристики намагничивания стали зубца  $B_{z0}=f(H_z)$ , учитывющей ответвление потока в паз при коэффициенте  $k_n=b_n/b_{zk}$ , определяется напряженность поля в зубце  $H_{zk}$  и индукция внешнего поля в пазу  $B_{ck}$  на расстоянии  $y_k$  от начала координат:

$$B_{ck} = \mu_0 H_{zk}. \quad (21)$$

Чтобы найти дополнительную тангенциальную силу  $\Delta F_{bx}$ , действующую на провод с током  $i_b$ , нужно знать среднее значение дополнительной индукции внешнего поля в зоне провода:

$$B_{b\Delta} = (B_{c4} + 4B_{cb} + B_{c5})/6,$$

где  $B_{c4}=\mu_0 H_{z4}$ ;  $B_{c5}=\mu_0 H_{z5}$ ;  $B_{cb}=\mu_0 H_{zb}$  — дополнительные индукции в пазу на расстояниях  $y_4$ ,  $y_5$  и  $y_b=(y_4+y_5)/2$  от начала координат по (21).

Вектор дополнительной индукции в зоне верхнего провода  $\bar{B}_{b\Delta}=\bar{q}_y B_{b\Delta}$  по направлению совпадает с вектором средней индукции внешнего поля в зазоре  $\bar{B}_{\delta cp}=\bar{q}_y B_{\delta cp}$ , откуда следует, что  $B_{b\Delta}=|B_{b\Delta}| (B_{\delta cp}/|B_{\delta cp}|)$ . Дополнительная тангенциальная сила, действующая в насыщенной машине на провод с током  $i_b$ , выражается через индукцию  $B_{b\Delta}$  по формуле

$$\Delta \bar{F}_{bx} = \bar{q}_x B_{b\Delta} i_b. \quad (22)$$

Таким же образом определяется дополнительная тангенциальная сила, действующая в насыщенной машине на провод с током  $i_h$ ,

$$\Delta \bar{F}_{hx} = \bar{q}_x B_{h\Delta} i_h. \quad (23)$$

В эту формулу входит среднее значение дополнительной индукции внешнего поля в зоне нижнего провода  $B_{h\Delta}$ , которая совпадает по направлению со средней индукцией внешнего поля в зазоре  $B_{\delta cp}$  и (с учетом сделанных выше замечаний) может быть выражена по формуле

$$B_{h\Delta} = (B_{\delta cp}/|B_{\delta cp}|) (B_{c6} + 4B_{ch} + B_{c7})/6,$$

где  $B_{c6}=\mu_0 H_{z6}$ ;  $B_{c7}=\mu_0 H_{z7}$ ;  $B_{ch}=\mu_0 H_{zh}$

— дополнительные индукции в пазу на расстояниях  $y_6$ ,  $y_7$  и  $y_h=(y_6+y_7)/2$  от начала координат по (21).

Сравнивая выражения основных и тангенциальных сил (14) (15) и дополнительных тангенциальных сил (22), (23), действующих на провода с токами  $i_b$  и  $i_h$ , видим, что эти силы совпадают по направлению. Поэтому результирующие тангенциальные силы  $\bar{F}_{bx}^h$  и  $\bar{F}_{hx}^h$ , действующие в насыщенной электрической машине

на провода с токами  $i_b$  и  $i_h$  всегда несколько превосходят тангенциальные силы  $\bar{F}_{bx}$  и  $\bar{F}_{hx}$ , найденные при бесконечно большой магнитной проницаемости стали зубцов:

$$|\bar{F}_{bx}^h| = |\bar{F}_{bx} + \Delta \bar{F}_{bx}| > |\bar{F}_{bx}|;$$

$$|\bar{F}_{hx}^h| = |\bar{F}_{hx} + \Delta \bar{F}_{hx}| > |\bar{F}_{hx}|.$$

Поскольку полная тангенциальная сила по (13) в насыщенной машине сохраняется без изменения, из (10), (16) следует, что насыщение приводит к некоторому уменьшению тангенциальной силы, приложенной к элементам магнитопровода паза:

$$|\bar{F}_{cx}^h| = |\bar{F}_{cx} - \bar{F}_{bx}^h - \bar{F}_{hx}^h| < |\bar{F}_{cx}| = |\bar{F}_{cx} - \bar{F}_{bx} - \bar{F}_{hx}|.$$

**Приложение.** Определение тангенциальной ЭМС, действующей во внешнем магнитном поле на провод с током в пазу сердечника электрической машины. Требуется определить тангенциальную ЭМС  $F_{ix}$ , которая действует во внешнем магнитном поле на единицу длины провода с током  $i$ , расположенному в прямоугольном пазу сердечника электрической машины (рис. 4).

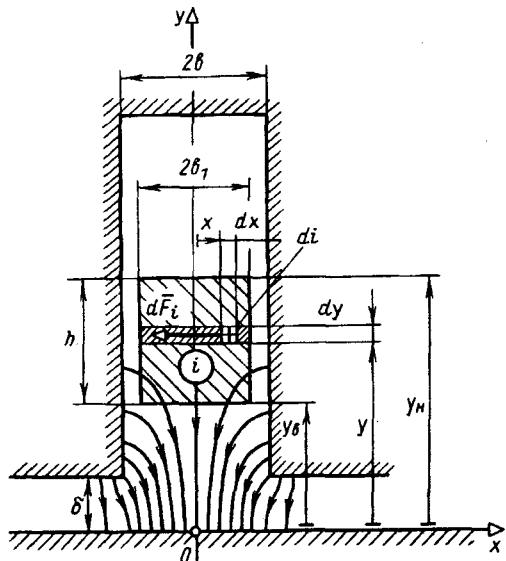


Рис. 4

Считываются известными: размеры области паза ( $b=b_n/2, \delta$ ); размеры провода ( $h, 2b_1$ ); размеры, определяющие положение провода в пазу ( $y_h$  и  $y_b$ ); ток провода  $i$ ; средняя индукция внешнего магнитного поля в зазоре ( $B_{\delta cp}=B_{cm}/k_{\delta 1}$ ). Искомая тангенциальная сила  $F_{ix}=\bar{q}_x F_{ix}$  находится по первому способу — формуле (1) — путем интегрирования элементарных тангенциальных сил  $dF_i$ , действующих на элементы объема про-

вода  $dV=dx dy \cdot 1$ , положение которых определяется координатами  $x$  и  $y$ :

$$\bar{F}_{ix} = 2 \int_{x=0}^{x=b_1} \int_{y=y_B}^{y=y_H} d\bar{F}_i = \bar{q}_x 2 \int_{x=0}^{x=b_1} \int_{y=y_B}^{y=y_H} B_{cy} J dx dy, \quad (\text{П-1})$$

где  $d\bar{F}_i = \bar{q}_x B_{cy} di = \bar{q}_x B_{cy} J dx dy$ ;  $J=i/(2hb_1)$  — плотность тока в проводе.

Для определения компоненты индукции внешнего поля  $B_{cy}$  в точке  $x, y$  воспользуемся результатами анализа внешнего (четного) магнитного поля. Исходя из [7, форм. (15), (17)], получим

$$B_{cy} = I_m \left( j B_{cm} \sqrt{\frac{t}{t+1}} \right), \quad (\text{П-2})$$

где  $t=u+jv$  — комплексная координата точки, соответствующей точке  $z=x+jy$ ;  $B_{cm}=-\mu_0 \psi_c/\delta = -k_{\delta 1} B_{\delta \text{cp}}$  — по [7, форм. (17), (19)]. Из (П-1) следует, что сила  $\bar{F}_i$  может быть выражена через ток  $i$  и среднее значение компоненты  $B_{cy}$  по сечению провода, равной  $B_{cy(\text{cp})}$ :

$$\bar{F}_{ix} = \bar{q}_x i B_{cy(\text{cp})}, \quad (\text{П-3})$$

$$\text{где } B_{cy(\text{cp})} = \frac{1}{h} \int_{y_B}^{y_H} B'_{cy(\text{cp})} dy; \quad B'_{cy(\text{cp})} = \frac{1}{b_1} \int_0^{b_1} B_{cy} dx -$$

среднее значение компоненты индукции по оси  $y$  в элементе тока высотой  $dy$  и шириной  $b_1$ , расположенному на расстоянии  $y$  от начала координат (рис. 4 и 5).

Предварительно докажем, что элементу тока высотой  $dy$  и шириной  $b_1$  (при  $y \geq \delta + 1,25b$ ) соответствует в плоскости  $t$  кольцеобразный токовый элемент радиусом  $r$  и центром в точке  $t$ , рас-

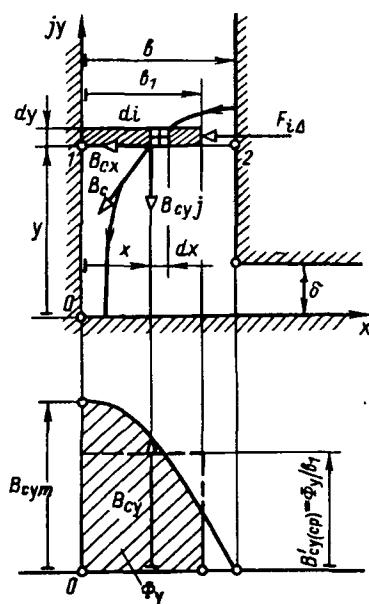


Рис. 5

положенной в начале координат. Точка 1 в плоскости  $z$  с координатой  $z=0+jy$  соответствует точке 1 в плоскости  $t$  с координатой  $t=r+0j$ , которая определяется путем решения нелинейного уравнения (5) относительно  $t$  по [7, приложение 2]. При  $y \geq \delta + 1,25b$  радиус  $r$  весьма мал по сравнению с  $a=(\delta/b)^2$  и 1, т. е.  $r \ll a$ ,  $r \ll 1$ .

Координаты точек на окружности  $12$  радиусом  $r$  будут определяться комплексом  $t=re^{j\theta}$ , где  $\theta$  — угол, определяющий положение точки на окружности ( $0 < \theta < \pi$ ).

При увеличении угла  $\theta$  на  $d\theta$  точка перемещается по окружности на расстояние  $dt = (dt/d\theta) d\theta = re^{j\theta} d\theta$ , равное приращению  $t$ . Приращению  $t$  на  $dt$  соответствует приращение  $z$  на  $dz$ , которое определяется с помощью [7, форм. (4)]:

$$dz = \left( \frac{dz}{dt} \right) dt = z'(t) dt = \frac{\delta}{\pi t} \sqrt{\frac{t+1}{t-a}} dt.$$

Подставляя в эту формулу записанные выше выражения для  $t$  и  $dt$  и имея в виду малость  $t$  по сравнению с  $a$  и 1 (поскольку  $r \ll a$  и  $r \ll 1$ ), получим

$$dz = dx + j dy = \frac{\delta}{\pi e^{j\theta}} \sqrt{\frac{re^{j\theta} + 1}{re^{j\theta} - 1}} j re^{j\theta} d\theta = \frac{b d\theta}{\pi},$$

откуда следует, что

$$dz = dx = (b d\theta)/\pi. \quad (\text{П-4})$$

Это означает, что перемещению шагами  $dt$  вдоль окружности радиуса  $r$  от точки 1 к точке 2 в плоскости  $t$  соответствует перемещение шагами  $dz=dx$  по линии 12 в плоскости  $z$ .

Интегрируя перемещение в плоскости  $z$ , найдем связь между координатами данной точки в плоскостях  $z$  и  $t$ .

Точке

$$z = x + jy, \quad (\text{П-5})$$

$$\text{где } x = \int_0^x dx = \int_0^r \frac{b}{\pi} d\theta = \frac{b}{\pi} \theta, \quad \text{соответствует точка } t = re^{j\theta}.$$

Отсюда видим, что  $x$  пропорционально  $\theta$ . Причем  $x=0$  соответствует  $\theta=0$ ;  $x=b$  соответствует  $\theta=\pi$ ;  $x=b_1$  соответствует  $\theta_1=b_1 \pi/b$ . Заштрихованный элемент тока в виде прямоугольной полоски с высотой  $dy$  и шириной  $b_1$  (П-2) соответствует заштрихованному кольцевому сектору, показанному на рис. 6.

Теперь имеется возможность найти распределение компоненты индукции  $B_{cy}$  по ширине паза. Из (П-2)–(П-5) при  $r \ll 1$  следует:

$$\begin{aligned} B_{cy} &= \text{Im} \left( j B_{cm} \sqrt{\frac{re^{j\theta}}{re^{j\theta} + 1}} \right) = \text{Im} \left( j B_{cm} \sqrt{\frac{r}{r+1}} e^{j\theta/2} \right) = \\ &= \text{Im} \left[ j B_{cm} \sqrt{\frac{r}{r+1}} \left( \cos \frac{\theta}{2} + j \sin \frac{\theta}{2} \right) \right] = \\ &= B_{cy\text{m}} \cos \frac{\theta}{2} - B_{cy\text{m}} \cos \left( \frac{x\pi}{2b} \right), \end{aligned} \quad (\text{П-6})$$

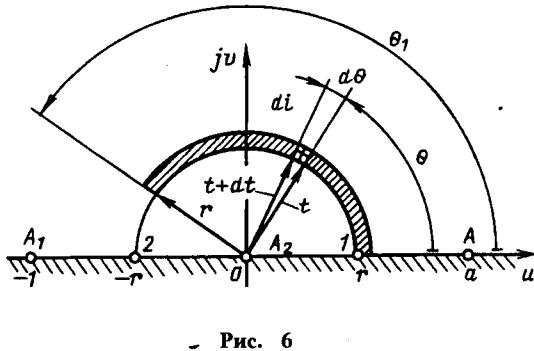


Рис. 6

где  $B_{cy} = B_{cm} \sqrt{\frac{r}{r+1}}$  — максимальное значение индукции внешнего поля на оси паза на расстоянии  $u$  от начала координат, найденное ранее [7, форм. (20)].

Легко найти и среднее значение компоненты индукции по оси  $u$  в элементе тока высотой  $dy$  и шириной  $2b_1$ , расположенному на расстоянии  $u$  от начала координат:

$$B_{cy}^{'} = \frac{1}{b_1} \int_{x=0}^{b_1} B_{cy} dx = \frac{1}{b_1} \int_0^{b_1} B_{cy} \cos\left(\frac{x\pi}{2b}\right) dx = k_{cp} B_{cy}^{*}, \quad (\text{П-7})$$

где  $k_{cp} = \sin\left(\frac{b_1\pi}{2b}\right) / \left(\frac{b_1\pi}{2b}\right)$  — коэффициент, равный отношению среднего значения компоненты индукции  $B_{cy}^{'}$  к ее максимальному значению  $B_{cy}$  по (П-6).

Видно, что коэффициент  $k_{cp}$  не зависит от координаты  $u$ , определяющей положение элемента тока по высоте паза. Это существенно облегчает определение средней по сечению провода индукции по (П-3) с учетом (П-6, П-7):

$$B_{cy}^{'} = \frac{1}{h} \int_{y=y_B}^{y_H} B_{cy}^{'} dy = \frac{k_{cp}}{h} \int_{y=y_B}^{y_H} B_{cy}^{*} dy = \frac{B_{cm} k_{cp}}{h} \times \times \int_{y=y_B}^{y_H} \sqrt{\frac{r}{r+1}} dy = \frac{B_{cm} k_{cp}}{h} \int_{y=y_B}^{y_H} \sqrt{\frac{t}{t+1}} dy.$$

Поскольку, как следует из [7, форм. (4)], при  $0 < t = r < a$   $dy = dz/j = \frac{\delta}{j\pi t} \sqrt{\frac{t+1}{t-a}} dt = -\frac{\delta}{\pi t} \sqrt{\frac{t+1}{a-t}} dt$ , после подстановки имеем:

$$B_{cy}^{'} = -\frac{B_{cm} k_{cp} \delta}{\pi h} \int_{t=t_B}^{t=t_H} \frac{dt}{\sqrt{t(a-t)}},$$

где  $t=r$  — соответствует точке  $z=jy$  на оси паза;  $t_B=r_B$  соответствует точке  $z_B=jy_B$ ;  $t_H=r_H$  соответствует точке  $z_H=jy_H$ . Причем значения  $t_B=r_B$  и  $t_H=r_H$  определяются из решения уравнения (5) относительно  $t$ . Интеграл  $\int dt / (\sqrt{t(a-t)})$  имеется в таблице неопределенных интегралов [4, стр. 363].

Подставив его значение для указанных пределов, получим

$$B_{cy}^{'} = \frac{B_{cm} k_{cp} \delta}{\pi h} \left( \arcsin \frac{a-2r_H}{a} - \arcsin \frac{a-2r_B}{a} \right). \quad (\text{П-8})$$

Тангенциальная сила, действующая на провод с током  $i$  во внешнем поле, определяется по (П-3):

$$F_{ix} = \bar{q}_x \frac{B_{cm} i k_{cp} \delta}{\pi h} [\arcsin(1-2r_H/a) - \arcsin(1-2r_B/a)],$$

где  $a = (\delta/b)^2$ ;  $b = b_H/2$ ;  $h$  — высота провода;  $\delta$  — зазор;  $r_H, r_B$  — координаты точек в плоскости  $t$ , соответствующие координатам  $y_H$  и  $y_B$  низа и верха провода и найденные путем решения уравнения [7, форм. (5)] относительно  $t$  с помощью [7, приложение 2];  $B_{cm} = k_{\delta} B_{\delta cp}$  — максимальная индукция внешнего поля в зазоре.

Расчет силы  $F_{ix}$  может быть существенно облегчен, если ввести функцию

$$A = (1/\pi) \arcsin(1-2r/a), \quad (\text{П-10})$$

которая зависит от относительного размера области паза  $\delta/b$  и от относительного значения координаты  $u$ , заданного в виде отношения  $y/b$ . Поскольку  $\delta/b$  и  $y/b$  могут изменяться в очень широких пределах, функцию  $A$  удобнее представить в виде зависимостей от  $\log\left(\frac{\delta}{b}\right)$  и от  $\log(y/b)$ , которые могут быть рассчитаны с помощью программы [7, приложение 2]. Такие зависимости в виде семейства характеристик  $A=f(\log(y/b))$  при различных значениях  $\log(\delta/b)$  в диапазоне от (-1) до 1,1 представлены на рис. 7. Пользуясь этими зависимостями, можно для любого паза рассчитать силу  $F_{ix}$  по фор-

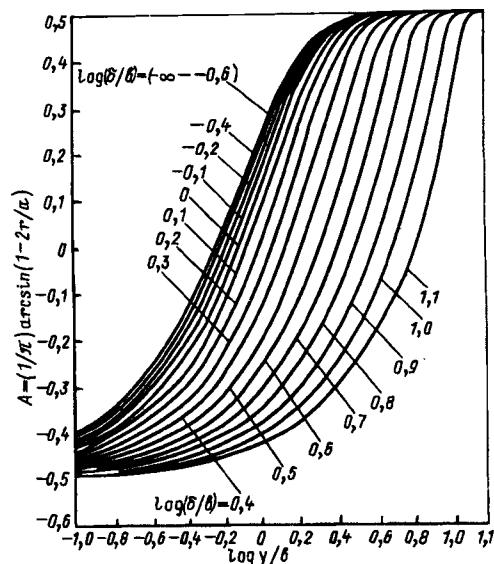


Рис. 7

мule (П-11), вытекающей из (П-9) и (П-10):

$$\bar{F}_{ix} = \bar{q}_x \frac{B_{cm} i k_{\varphi} \delta}{h} (A_H - A_B), \quad (\text{П-11})$$

в которой

$$A_H = (1/\pi) \arcsin(1 - 2r_H/a) = f(\log(y_H/b));$$

$$A_B = (1/\pi) \arcsin(1 - 2r_B/a) = f(\log(y_B/b))$$

— функции  $A = f(\log(y/b))$ , найденные по рис. 7 при значении  $\log(\delta/b)$ , соответствующем заданному пазу (для определения  $A_H$  и  $A_B$  используется линейная интерполяция). Более точные значения  $A_H$  и  $A_B$  в случае необходимости могут быть рассчитаны с помощью программы из [7, приложение 2].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. — М.: Высшая школа, 1989.
2. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / Пер. с англ. — М.: Энергия, 1970.
3. Гаспарян В.Р., Мнацканян М.С. Электромагнитные силы в области полузакрытого паза электрической машины. — Электричество, 1987, № 5.
4. Бронштейн И.Н., Семеняев К.А. Справочник по математике. — М.: ГИТГД, 1953.
5. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А.В. Иванов-Смоленский, Ю.В. Абрамкин, А.И. Власов, В.А. Кузнецова. Под ред. А.В. Иванова-Смоленского. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины.

Учебник для вузов. — М.: Энергия, 1980.

7. Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В., Аванесов М.А., Хуан Море Оучи. Анализ магнитного поля в области паза магнитного сердечника электрической машины. — Электричество. 1995, № 5.

[27.01.94]

Авторы: Иванов-Смоленский Алексей Владимирович окончил в 1944 г. электромеханический факультет МЭИ. В 1966 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах» в МЭИ. Профессор кафедры электромеханики МЭИ.

Абрамкин Юрий Васильевич окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1962 г. В 1975 г. защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию по теме «Исследование электромагнитных процессов и потерь в синхронных электрических машинах с малым числом пазов на полюс и фазу». Доцент кафедры электромеханики МЭИ.

Аванесов Михаил Аврамович окончил в 1975 г. электромеханический факультет МЭИ. Научный сотрудник кафедры электромеханики МЭИ.

Море Оучи Хуан окончил в 1982 г. электроэнергетический факультет МЭИ. Аспирант кафедры электромеханики МЭИ. Гражданин Республики Перу.

## Уравнения нестационарных процессов в трехфазных индукторных генераторах

СКУБОВ Д.Ю., ХОДЖАЕВ К.Ш.

Получены уравнения нестационарных электромеханических процессов в трехфазных разноименнополюсных индукторных генераторах с зубцовой обмоткой якоря при различных вариантах включения на нагрузку. Проведено асимптотическое преобразование этих уравнений, на основе чего исследованы стационарные режимы, а также нестационарные режимы при скачкообразном изменении величины сопротивления нагрузки. Показано, что нестационарные процессы при включении машины с нулевым проводом и без него описываются одними и теми же асимптотически упрощенными уравнениями.

Ключевые слова: индукторные генераторы, нестационарные электромеханические процессы

Известно [1], что уравнения, описывающие электромеханические процессы в трехфазных ин-

Equations for transient electromechanical processes in three-phase opposite-pole inductor generators with tooth winding of armature are derived at diverse variants of connection on a load. On the basis of a asymptotic transformation of these equations steady-state conditions as well as transient conditions under a step change of a load resistance value are investigated. It is shown that transient processes when connecting machines with neutral conductor and without it are described by the same asymptotic simplified equations.

Key words: inductor generators, transient electromechanical processes, calculation

дукторных машинах с некоторыми типами обмоток якоря, совпадают с уравнениями процессов

в явнополюсных синхронных машинах. Однако это относится главным образом к машинам с уравновешенными обмотками при числе зубцов статора на полюс и фазу, равном или большем двух. Для машин с другими обмотками якоря уравнения Лагранжа—Максвелла имеют иной вид. Их выводу и упрощению с помощью соответствующего асимптотического метода нелинейной механики посвящена настоящая работа. Асимптотическое преобразование уравнений электромеханических процессов в однофазных генераторах с активно-индуктивной нагрузкой выполнено в [2].

Рассматриваются различные варианты включения машины с зубцовой обмоткой якоря [1], работающей генератором на симметричную активно-индуктивную нагрузку. Полученные результаты можно использовать для исследования и расчета нестационарных процессов при набросе и сбросе нагрузки, при работе машины в режиме кратковременного действия и т. д. Работа машины в режиме двигателя от мощной сети, а также короткие замыкания здесь не рассматриваются; они требуют отдельного исследования.

Разноименнополюсная машина, работающая на активно-индуктивную нагрузку по схеме «звезда—звезда» без нулевого провода. Уравнения Лагранжа—Максвелла. Разворотка зубцовой зоны машины приведена на рис. 1. Три катушки якоря,

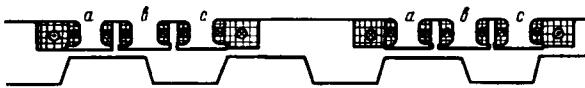


Рис. 1

расположенные в пределах одного зубцового деления ротора, сдвинуты в пространстве на 1/3 пазового деления ротора. Катушки, отстоящие друг от друга на зубцовое деление ротора, соединены последовательно, встречно и образуют фазу. Пазы статора полузакрытые. При составлении уравнений Лагранжа—Максвелла не учитываются магнитное сопротивление стали и вихревые токи.

Обозначим через  $i_f, i_a, i_b, i_c$  соответственно токи в обмотке возбуждения и фазных обмотках, а через  $w_0, w$  — числа витков. Примем за независимые контурные токи  $i_a$  и  $i_b$ , тогда  $i_c = -(i_a + i_b)$ . Составив уравнения Кирхгофа для магнитной цепи, можно показать, что магнитные потенциалы стали ротора и статора одинаковы, поэтому магнитные потоки через зубцы статора  $\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$  будут

$$\Phi_a = w i_a g_a + w_0 i_f g_a; \quad \Phi_b = w i_b g_b + w_0 i_f g_b; \quad (1)$$

$$\Phi_c = -w (i_a + i_b) g_c + w_0 i_f g_c,$$

где  $g_a(\varphi), g_b(\varphi), g_c(\varphi)$  — магнитные проводимости зазоров под соответствующими зубцами статора;  $\varphi = z\vartheta$ ,  $\vartheta$  — угол поворота ротора (начало отсчета указано далее);  $z$  — число зубцов ротора.

Зная  $\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$ , можно найти потокосцепления контуров  $a, b, f$ :

$$\begin{aligned} \Psi_a &= zw(\Phi_a - \Phi_c) + Li_a + L(i_a + i_b) = [zw^2(g_a + g_c) + \\ &+ 2L]i_a + (zw^2g_c + L)i_b + zw w_0(g_a - g_c)i_f; \\ \Psi_b &= (zw^2g_c + L)i_a + [zw^2(g_b + g_c) + 2L]i_b + \\ &+ zw w_0(g_b - g_c)i_f; \\ \Psi_f &= zw w_0(\Phi_a + \Phi_b + \Phi_c) = zw w_0(g_a - g_c)i_a + \\ &+ zw w_0(g_b - g_c)i_b + zw^2 g_0 i_f, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $g_0 = g_a + g_b + g_c$  — проводимость зазора под катушечной группой в пределах одного периода зубцов ротора;  $g_0$  не зависит от  $\varphi$ .

Отметим основные свойства магнитных проводимостей  $g_a(\varphi), g_b(\varphi), g_c(\varphi)$ : во-первых, для них справедливы соотношения сдвига  $g_b(\varphi) = g_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right), g_c(\varphi) = g_a\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) = g_b\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$ ; во-вторых, они не содержат гармоник с номерами, кратными трем, поскольку их сумма равна константе.

Коэффициенты при токах в выражениях потокосцеплений (2) являются коэффициентами само- и взаимоиндукций рассматриваемых контуров. Обозначив их через  $L_a, L_b, L_f, M_{ab}, M_{af}, M_{bf}$ , запишем выражение энергии магнитного поля:

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} L_a i_a^2 + \frac{1}{2} L_b i_b^2 + \frac{1}{2} L_f i_f^2 + M_{ab} i_a i_b + \\ &+ M_{af} i_a i_f + M_{bf} i_b i_f. \end{aligned} \quad (3)$$

Теперь можно составить уравнение вращения ротора:

$$J \ddot{\vartheta} = \frac{\partial W}{\partial \vartheta} + M, \quad (4)$$

где  $M$  — внешний момент, приложенный к ротору при работе машины генератором. Выражение для электромагнитного момента  $\frac{\partial W}{\partial \vartheta}$  имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \vartheta} &= \frac{1}{2} z^2 w [w(g_a' + g_c')i_a^2 + w(g_b' + g_c')i_b^2 + 2wg_c'i_a i_b + \\ &+ 2w_0(g_a' - g_c')i_a i_f + 2w_0(g_b' - g_c')i_b i_f], \end{aligned} \quad (5)$$

где штрихом обозначено дифференцирование по углу  $\varphi$ . При прямоугольном сечении зубца ротора производные  $g_a', g_b', g_c'$  будут разрывными функциями  $\varphi$ , что, однако, для дальнейшего несущественно.

Вычислим определитель  $\Delta$ , составленный из

коэффициентов индукции при  $L=0$ ,

$$\Delta = 9g_a g_b g_c \neq 0. \quad (6)$$

Это означает, что даже при чисто активной нагрузке и пренебрежении потоками рассеяния из последующих уравнений нельзя выразить один ток через два остальных (подробнее см. раздел, относящийся к схеме с нулевым проводом).

Введем вместо исходных неизвестных токов безразмерные переменные  $i_{au}, i_{bu}, i_{fu}$ , определив их соотношениями:

$$i_{au} = i_a / i_*; \quad i_{bu} = i_b / i_*; \quad i_{fu} = i_f / i_*. \quad (7)$$

Здесь  $i_*$  — характерное значение фазного тока,  $i_f = i_* w / w_0$ . Безразмерные потокосцепления обозначим  $\Psi_{au}, \Psi_{bu}, \Psi_{fu}$ :

$$\begin{aligned} \Psi_{au} &= \Psi_a / z w^2 g_0 i_*; \quad \Psi_{bu} = \Psi_b / z w^2 g_0 i_*; \\ \Psi_{fu} &= \Psi_f / z w w^0 g_0 i_*. \end{aligned} \quad (8)$$

Вместо (2) получим выражения безразмерных потокосцеплений через безразмерные токи:

$$\begin{aligned} \Psi_{au} &= (g_{au} + g_{cu} + 2l) i_{au} + (g_{cu} + l) i_{bu} + (g_{au} - g_{cu}) i_{fu}; \\ \Psi_{bu} &= (g_{cu} + l) i_{au} + (g_{bu} + g_{cu} + 2l) i_{bu} + (g_{bu} - g_{cu}) i_{fu}; \\ \Psi_{fu} &= (g_{au} - g_{cu}) i_{au} + (g_{bu} - g_{cu}) i_{bu} + i_{fu}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $g_{au} = g_a / g_0$ ;  $g_{bu} = g_b / g_0$ ;  $g_{cu} = g_c / g_0$  — безразмерные магнитные проводимости,  $l = L / z w^2 g_0$  — безразмерная индуктивность нагрузки.

Введем еще безразмерное время  $\tau = z \Omega_* t$  и безразмерную угловую скорость  $\omega = \vartheta / \Omega_*$ , где  $\Omega_*$  — характерная угловая скорость вращения ротора. Запишем теперь безразмерные уравнения Лагранжа—Максвелла, отбрасывая при этом индекс «*u*» у безразмерных переменных и коэффициентов и обозначая точкой дифференцирование по безразмерному времени:

$$\begin{aligned} [(g_a + g_c + 2l) i_a + (g_c + l) i_b + (g_a - g_c) i_f] + r(2i_a + i_b) &= 0; \\ [(g_c + l) i_a + (g_b + g_c + 2l) i_b + (g_b - g_c) i_f] + r(2i_b + i_a) &= 0; \\ [(g_a - g_c) i_a + (g_b - g_c) i_b + i_f] + \varepsilon_f r_f i_f &= \varepsilon_f e_f; \\ \omega &= \varepsilon_\omega \left[ \frac{1}{2} (g_a' + g_c') i_a^2 + \frac{1}{2} (g_b' + g_c') i_b^2 + g_c' i_a i_b + \right. \\ &\quad \left. + (g_a' - g_c') i_a i_f + (g_b' - g_c') i_b i_f \right] + \varepsilon_\omega m; \\ \dot{\varphi} &= \omega, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $r = R / (z^2 w^2 g_0 \Omega_*)$ ;  $\varepsilon_f r_f = R_f / (z^2 w_0^2 g_0 \Omega_*)$ ,  $\varepsilon_f e_f = E_f / (z^2 w_0^2 g_0 \Omega_* i_*)$ ;  $\varepsilon_\omega = z w^2 g_0 i_*^2 / (J \Omega_*^2)$ ;  $\varepsilon_\omega m = M / (J z \Omega_*^2)$ ;  $R$  и  $R_f$  — соответственно активное сопротивление нагрузки и цепи возбуждения;  $E_f$  — напряжение возбуждения; коэффициенты  $\varepsilon_\omega$  и  $\varepsilon_f$  введены по причинам, объясненным далее.

### Асимптотическое преобразование уравнений.

Уравнения медленных нестационарных процессов. Рассматривается случай, когда активное сопротивление нагрузки примерно равно характерному индуктивному сопротивлению обмоток якоря. При этом мощность, потребляемая нагрузкой, будет того же порядка, что и номинальная мощность машины. Значение  $r$  в (10) в таком случае будет иметь порядок единицы, а  $\varepsilon_f r_f$ ,  $\varepsilon_\omega$  и  $\varepsilon_f e_f$  — значительно меньше единицы; чтобы это подчеркнуть, и введены обозначения малых параметров  $\varepsilon_f$  и  $\varepsilon_\omega$ . Малость этих параметров объясняется тем, что характерная постоянная времени цепи возбуждения и механическая постоянная времени много больше характерной постоянной времени якорных цепей. Для обычных синхронных машин малость параметров в безразмерных уравнениях Лагранжа—Максвелла или Парка—Горева обсуждается в [3—4]; эти рассуждения применимы и к рассматриваемым машинам.

Малость параметров  $\varepsilon_f$  и  $\varepsilon_\omega$  позволяет использовать для упрощения уравнений (10) асимптотические методы нелинейной механики (для исследования динамики обычных синхронных машин при различных нагрузках этот метод использован в [3, 4]). Но предварительно удобнее принять за неизвестную величину потокосцепление  $\Psi_f$ , исключив из уравнений ток возбуждения  $i_f$ . Выразим из (9) ток  $i_f$  через  $\Psi_f, i_a, i_b$ :

$$i_f = \Psi_f - (g_a - g_c) i_a - (g_b - g_c) i_b. \quad (11)$$

Внеся (11) в (10) и приняв за аргумент угол  $\varphi$  вместо времени, придем к уравнениям:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\varphi} \left\{ [g_a + g_c + 2l - (g_a - g_c)^2] i_a + [g_c + l - (g_a - g_c) (g_b - g_c)] i_b + (g_a - g_c) \Psi_f \right\} + \frac{r}{\omega} (2i_a + i_b) &= 0; \\ \frac{d}{d\varphi} \left\{ g_c + l - (g_a - g_c) (g_b - g_c) \right\} i_a + [g_b + g_c + 2l - (g_b - g_c)^2] i_b + (g_b - g_c) \Psi_f &= 0; \\ \frac{d}{d\varphi} \Psi_f + \frac{\varepsilon_f r_f}{\omega} [\Psi_f - (g_a - g_c) i_a - (g_b - g_c) i_b] &= \frac{\varepsilon_f e_f}{\omega}; \\ \frac{d\omega}{d\varphi} &= \frac{\varepsilon_\omega}{\omega} \left\{ \left[ \frac{1}{2} (g_a' + g_c') - (g_a' - g_c') (g_a + g_c) \right] i_a^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left[ \frac{1}{2} (g_b' + g_c') - (g_b' - g_c') (g_b - g_c) \right] i_b^2 + [g_c' - (g_a' - g_c')] \times \right. \\ &\quad \left. \times (g_b - g_c) - (g_b' - g_c') (g_a - g_c) \right] i_a i_b + (g_a' - g_c') i_a \Psi_f + \\ &\quad \left. + (g_b' - g_c') i_b \Psi_f \right\} + \frac{\varepsilon_\omega}{\omega} m. \end{aligned} \quad (12)$$

В (12) входят две группы переменных: быстрые  $i_a, i_b$  и медленные  $\Psi_f$  и  $\omega$ . Согласно применяемому здесь методу усреднения [4] следует решить первые два уравнения относительно  $i_a$  и  $i_b$ , считая при этом  $\Psi_f$  и  $\omega$  постоянными

параметрами. Затем внести эти решения в остальные два уравнения (12) и усреднить по  $\varphi$ . Полученные таким образом уравнения относительно  $\Psi_f$  и  $\omega$  являются уравнениями медленных нестационарных процессов.

Что же касается решений двух первых уравнений (12) при  $\Psi_f, \omega = \text{const}$   $i_a(\varphi, \Psi_f, \omega), i_b(\varphi, \Psi_f, \omega)$ , то можно определить только их стационарную часть, не учитывая входящие в общие решения быстрозатухающие функции  $\varphi$ , которые не вносят вклада при усреднении. Стационарные решения для  $i_a, i_b$  являются  $2\pi$ -периодическими функциями  $\varphi$ , пропорциональными  $\Psi_f$ .

Докажем, что стационарные решения  $i_a, i_b$  связаны соотношением  $i_b(\varphi) = i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$ . Запишем три уравнения: уравнение быстрой подсистемы и два уравнения, получающиеся из первого заменой  $\varphi$  на  $\varphi - \frac{2\pi}{3}$  и  $\varphi + \frac{2\pi}{3}$ . Учитывая свойства магнитных проводимостей  $g_a, g_b, g_c$  и предполагаемые равенства  $i_a(\varphi) = i_b\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right)$ ,  $i_b\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) = i_a\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right)$ , получим:

$$\begin{aligned} & \{[g_a + g_c + 2l - (g_a - g_c)^2] i_a + [g_c + l - (g_a - g_c)(g_b - g_c)] \times \\ & \times i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + (g_a - g_c)\Psi_f\}' + \frac{r}{\omega} \left[ 2i_a(\varphi) + i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \right] = 0; \\ & \{[g_b + g_a + 2l - (g_b - g_a)^2] i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + [g_a + l - (g_b - g_a)(g_c - g_a)] i_a\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + (g_b - g_a)\Psi_f\}' + \\ & + \frac{r}{\omega} \left( 2i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + i_a\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \right) = 0; \\ & \{[g_c + g_b + 2l - (g_c - g_b)^2] i_a\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + [g_b + l - (g_c - g_b)(g_a - g_b)] \times \\ & \times (g_a - g_b) i_a(\varphi) + (g_c - g_b)\Psi_f\}' + \\ & + \frac{r}{\omega} \left( 2i_a\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + i_a(\varphi) \right) = 0. \end{aligned}$$

Сложим эти три уравнения, получим линейное однородное дифференциальное уравнение первого порядка относительно суммы  $i_a(\varphi) + i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + i_a\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) = i_0(\varphi)$ :

$$\begin{aligned} & \{[g_a + g_b + g_c + 3l - g_a^2 - g_b^2 - g_c^2 + g_a g_c + g_b g_a + g_c g_b] i_0(\varphi)\}' + \\ & + 3 \frac{r}{\omega} i_0(\varphi) = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Это уравнение имеет единственное периодическое решение  $i_0 \equiv 0$ .

Заменим теперь аргумент  $\varphi$  на  $\varphi + \frac{2\pi}{3}$  в первом уравнении быстрой подсистемы. В предположении, что  $i_b(\varphi) = i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$ , с помощью доказанного

соотношения  $i_0 \equiv 0$  получим:

$$\begin{aligned} & \{-[g_c + g_b + 2l - (g_c - g_b)^2] i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) - [g_c + l - (g_b - g_c) \times \\ & \times (g_a - g_c)] i_a(\varphi) - (g_b - g_c)\Psi_f\}' - \frac{r}{\omega} \left[ 2i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + i_a(\varphi) \right] = 0. \end{aligned}$$

Это уравнение совпадает со вторым уравнением из (12), если считать в нем  $i_b(\varphi) = i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$ .

Таким образом, показано следующее. Пусть при  $\Psi_f, \omega = \text{const}$  найдено  $2\pi$ -периодическое решение  $i_a(\varphi)$  дифференциально-разностного уравнения:

$$\begin{aligned} & \{[g_a + g_c + 2l - (g_a - g_c)^2] i_a(\varphi) + [g_c + l - (g_a - g_c)(g_b - g_c)] \times \\ & \times i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)\}' + \frac{r}{\omega} \left[ 2i_a(\varphi) + i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \\ & = (g_c - g_a)\Psi_f. \end{aligned} \quad (14)$$

Уравнение, получающееся из (14) заменой  $\varphi$  на  $\varphi + \frac{2\pi}{3}$ , равносильно (14) и имеет решение  $i_a\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right)$ . Но это уравнение при условии  $i_0 \equiv 0$  совпадает со вторым уравнением (12), если в нем положить  $i_b(\varphi) = i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$ . Следовательно,  $i_a(\varphi)$  и  $i_b(\varphi) = i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$  составляют  $2\pi$ -периодическое решение быстрой подсистемы.

Для определения этого решения можно использовать, например, метод гармонического баланса. Очевидно, что Фурье-разложения стационарных токов  $i_a, i_b$  не будут содержать гармоники, кратные трём, поскольку сумма  $i_a(\varphi) + i_a\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + i_a\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) = 0$ .

После того как стационарные  $i_a(\varphi), i_b(\varphi)$  найдены, их следует подставить в медленную подсистему и усреднить правые части по  $\varphi$ , которые после этого будут функциями только  $\Psi_f$  и  $\omega$ :

$$\begin{aligned} \Psi_f' &= -\frac{\epsilon_f r_f}{\omega} (\Psi_f - (g_a - g_c) i_a - (g_b - g_c) i_b) + \frac{\epsilon_f e_f}{\omega}; \\ \omega' &= \frac{\epsilon \omega}{\omega} \left[ \left[ \frac{1}{2} (g_a' + g_c') - (g_a' - g_c') (g_a - g_c) \right] i_a^2 + \right. \\ & + \left. \left[ \frac{1}{2} (g_b' + g_c') - (g_b' - g_c') (g_b - g_c) \right] i_b^2 + [g_c' - (g_a' - g_c')] \times \right. \\ & \times (g_b - g_c) - (g_b' - g_c') (g_a - g_c) \left. i_a i_b + \right. \\ & + (g_a' - g_c') i_a \Psi_f + (g_b' - g_c') i_b \Psi_f \left. \right] + \frac{\epsilon \omega}{\omega} m. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь обозначено

$$\langle f(\varphi) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi_0}^{\varphi_0 + 2\pi} f(\varphi) d\varphi.$$

Полученные уравнения позволяют рассчитать как стационарный режим работы машины, так

и нестационарный при работе ее генератором кратковременного действия, набросе нагрузки и т. д.

Важна роль уравнения (14), представляющего собой линейное дифференциально-разностное уравнение с периодическими коэффициентами. Уравнения такого типа ранее, по-видимому, не встречались в теории электрических машин.

**Включение звездой с нулевым проводом.** В этом случае в электрической схеме якоря можно выделить три независимых контурных тока  $i_a, i_b, i_c$ . Потокосцепления всех контуров находятся аналогично предыдущему:

$$\Psi_a = (zw^2 g_a + L) i_a + zw w_0 g_a i_f;$$

$$\Psi_b = (zw^2 g_b + L) i_b + zw w_0 g_b i_f;$$

$$\Psi_c = (zw^2 g_c + L) i_c + zw w_0 g_c i_f;$$

$$\Psi_f = zw w_0 g_a i_a + zw w_0 g_b i_b + zw w_0 g_c i_c + zw w_0^2 g_0 i_f \quad (16)$$

Выражение для энергии магнитного поля

$$\begin{aligned} W = & \frac{1}{2} (zw^2 g_a + L) i_a^2 + \frac{1}{2} (zw^2 g_b + L) i_b^2 + \\ & + \frac{1}{2} (zw^2 g_c + L) i_c^2 + \frac{1}{2} zw w_0^2 g_0 i_f^2 + zw w_0 g_a i_a i_f + \\ & + zw w_0 g_b i_b i_f + zw w_0 g_c i_c i_f. \end{aligned} \quad (17)$$

При  $L=0$

$$\Psi_f = \frac{w_0}{w} (\Psi_a + \Psi_b + \Psi_c). \quad (18)$$

Отсюда следует, что при чисто активной нагрузке ( $L=0$ ) и пренебрежении потоками рассеяния имеется полная магнитная связь между четырьмя электрическими контурами машины и из уравнений Лагранжа—Максвелла один ток можно выразить через остальные. В результате, на первый взгляд, возникают существенные отличия от случая схемы без нулевого провода. Покажем, что это не так; покажем также, что при  $L=0$  и  $L \neq 0$  вид окончательных уравнений один и тот же.

Введем безразмерные переменные (это делается так же, как и ранее) и в выражениях потокосцеплений учтем потоки рассеяния:

$$\Psi_a = (g_a + l) i_a + g_a i_f + \varepsilon_r \gamma i_a;$$

$$\Psi_b = (g_b + l) i_b + g_b i_f + \varepsilon_r \gamma i_b;$$

$$\Psi_c = (g_c + l) i_c + g_c i_f + \varepsilon_r \gamma i_c;$$

$$\Psi_f = g_a i_a + g_b i_b + g_c i_c + i_f + \varepsilon_r \gamma_f i_f. \quad (19)$$

Здесь принятые самые простые выражения  $\varepsilon_r \gamma i_a, \varepsilon_r \gamma i_b$  и т. д. для потоков рассеяния. Конкретный вид этих выражений далее несуществен, важно, что рассеяние есть и оно мало, т. е.  $\varepsilon_r$  — малая величина.

По соотношениям (17), (19), можно составить безразмерные уравнения Лагранжа—Максвелла:

$$\begin{aligned} [(g_a + l + \varepsilon_r \gamma) i_a + g_a i_f] + ri_a &= 0; \\ [(g_b + l + \varepsilon_r \gamma) i_b + g_b i_f] + ri_b &= 0; \\ [(g_c + l + \varepsilon_r \gamma) i_c + g_c i_f] + ri_c &= 0; \\ [g_a i_a + g_b i_b + g_c i_c + (1 + \varepsilon_r \gamma_f) i_f] + \varepsilon_f r_f i_f &= \varepsilon_f e_f; \quad (20) \\ \omega &= \varepsilon_\omega \left[ \frac{1}{2} g_a' i_a^2 + \frac{1}{2} g_b' i_b^2 + \frac{1}{2} g_c' i_c^2 + g_a' i_a i_f + \right. \\ &\quad \left. + g_b' i_b i_f + g_c' i_c i_f \right] + \varepsilon_\omega m; \\ \dot{\varphi} &= \omega. \end{aligned}$$

Введем в этих уравнениях вместо  $i_c$  и  $i_f$  новые переменные  $i_0 = i_a + i_b + i_c$  и  $\Psi_f$

$$\begin{aligned} i_c &= i_0 - i_a - i_b; \\ i_f &= \Psi_f - (g_a - g_c) i_a - (g_b - g_c) i_b - g_c i_0. \end{aligned} \quad (21)$$

Сложим первые три уравнения (20) и вычтем из суммы четвертое уравнение. Заменив затем  $i_c, i_f$  согласно (20), получим

$$\begin{aligned} & [(g_a + l - g_a^2 + g_a g_c) i_a - g_a (g_b - g_c) i_b - g_a g_c i_0 + \\ & \quad + g_a \Psi_f] + ri_a = 0; \\ & [(g_b + l - g_b^2 + g_b g_c) i_b - g_b (g_a - g_c) i_a - g_b g_c i_0 + \\ & \quad + g_b \Psi_f] + ri_b = 0; \\ & [(l + \gamma \varepsilon_r + \varepsilon_r \gamma_f g_c) i_0 + \varepsilon_r \gamma_f (g_a - g_c) i_a + \varepsilon_r \gamma_f (g_b - g_c) i_b - \\ & \quad - \varepsilon_r \gamma_f \Psi_f] + ri_0 - \varepsilon_f r_f [\Psi_f - (g_a - g_c) i_a - \\ & \quad - (g_b - g_c) i_b - g_c i_0] = -\varepsilon_f e_f; \\ & \Psi_f + \varepsilon_f r_f [\Psi_f - (g_a - g_c) i_a - (g_b - g_c) i_b - g_c i_0] = \varepsilon_f e_f; \\ & \omega = \varepsilon_\omega \left\{ \left[ \frac{1}{2} (g_a' + g_c') - (g_a' - g_c') (g_a - g_c) \right] i_a^2 + \right. \\ & \quad + \left[ \frac{1}{2} (g_b' + g_c') - (g_b' - g_c') (g_b - g_c) \right] i_b^2 + [g_c' - (g_a' - g_c')] \times \\ & \quad \times (g_b - g_c) - (g_b' - g_c') (g_a - g_c)] i_a i_b + (g_a' - g_c') i_a \Psi_f + \\ & \quad + (g_b' - g_c') i_b \Psi_f - [g_c' + (g_a' - g_c') g_c + g_c' (g_a - g_c)] i_a i_0 - \\ & \quad - [g_c' + (g_b' - g_c') g_c + g_c' (g_b - g_c)] i_b i_0 + g_c' i_0 \Psi_f - \\ & \quad \left. - g_c' g_c i_c^2 \right\} + \varepsilon_\omega m; \\ \dot{\varphi} &= \omega. \end{aligned} \quad (22)$$

В первых двух уравнениях (22) отброшены малые члены, пропорциональные  $\varepsilon_r$ , не имеющие значения. Наоборот, малые члены в третьем урав-

нении нужны для анализа случая  $l=0$  или малых  $l$ . В этом случае неизвестные в уравнениях Лагранжа–Максвелла распределяются на три группы: медленные  $\Psi_f$  и  $\omega$  с производными порядка  $\varepsilon_f, \varepsilon_\omega$ ; быстрые  $i_a, i_b, \varphi$  с производными порядка единицы и одна неизвестная  $i_0$  будет сверхбыстрой с производной порядка  $1/\varepsilon_r$ . Соответственно переходный процесс, например, при включении машины протекает в три этапа. Вначале за безразмерное время порядка  $\varepsilon_r$  в первом приближении становится равным нулю суммарный ток  $i_0$ . Затем за время порядка единицы затухают быстрые процессы в цепях якоря и токи якоря «выходят» на квазистационарный режим. За это время  $\Psi_f$  и  $\omega$  в первом приближении не меняются. Наконец, в соответствии с уравнениями медленных нестационарных процессов за время порядка  $\max(1/\varepsilon_\omega, 1/\varepsilon_f)$  машина выходит на стационарный режим.

При не малом  $l$  сверхбыстрого процесса не существует и все три переменные  $i_a, i_b, i_0$  за время порядка единицы выходят на квазистационарный режим. В этом режиме в первом приближении  $i_0=0$ .

Покажем теперь, что уравнения квазистационарного режима для машины с нулевым проводом в первом приближении совпадают с (12). Положив  $i_0=0$  в первых двух уравнениях (22), умножим первое на два и сложим со вторым. Учитывая, что  $g_a+g_b+g_c=1$ , для коэффициентов перед  $i_a$  и  $i_b$  получим выражения:

$$\begin{aligned} 2g_a + 2l - 2g_a^2 + 2g_a g_c + g_b g_c - g_a g_b &= 2g_a + 2l - \\ - 2g_a^2 + 2g_a g_c + g_c (1-g_a - g_c) - g_a (1-g_a - g_c) &= \\ &= g_a + g_c + 2l - (g_a - g_c)^2; \\ - 2g_a (g_b - g_c) + g_b + l - g_b^2 + g_b g_c &= \\ &= g_c + l - (g_a - g_c) (g_b - g_c). \end{aligned}$$

Второе уравнение из (12) получаем, сложив первое (22) с удвоенным вторым. Коэффициенты при  $\Psi_f$  получаются тем же способом. Например,

$$[(2g_a + g_b) \Psi_f]' = [(1+g_a - g_c) \Psi_f]' = (g_a - g_c)' \Psi_f.$$

Остальные уравнения из (12) для медленных переменных получаются из (22) подстановкой  $i_0=0$ .

Таким образом, если не интересоваться быстро затухающими «начальными» процессами, то машины с нулевым проводом и без него описываются одними и теми же уравнениями. Для обычных синхронных машин это можно показать с помощью преобразования Парка,  $\alpha, \beta, 0$  преобразований и т.д.; это справедливо для любых значений параметров. В данном же случае доказательство сложнее и существенно опирается

на малость параметров  $\varepsilon_f, \varepsilon_\omega$  и  $\varepsilon_r$ .

**Приложение.** В качестве примера используя упрощенных уравнений (15) приведем расчет статической характеристики трехфазного генератора — зависимости электромагнитного момента от угловой скорости, а также расчет переходного режима при скачкообразном изменении сопротивления нагрузки. Для отыскания стационарного решения уравнения (14) используем Фурье-разложение тока  $i_a$ , т.е. ищем  $i_a$  в виде ряда, не содержащего гармоники, кратные трем:

$$i_a(\varphi) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq 3}} (i_{kc} \cos k\varphi + i_{ks} \sin k\varphi). \quad (\Pi-1)$$

Для упрощения выкладок учтем в выражении магнитной проводимости среднюю составляющую и первую гармонику угла  $\varphi$ :  $g_a(\varphi)=1/3+a_1 \times \cos \varphi$  (постоянная составляющая, равная  $1/3$  присутствует в силу равенства  $g_a+g_b+g_c=1$ ). Относительно коэффициентов гармоник тока получим систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} - \left[ \sqrt{3} \left( 1+l-\frac{3}{2} a_1^2 \right) - \frac{r}{w} \right] i_{1c} + \left( 1+l+\sqrt{3} \frac{r}{w} \right) i_{1s} - \\ - \frac{a_1}{2} (\sqrt{3} i_{2c} - i_{2s}) = \sqrt{3} a_1 \Psi_f; \\ \left[ \sqrt{3} (1+l) - \frac{r}{w} \right] i_{1s} + \left( 1+l-\frac{3}{2} a_1^2 + \sqrt{3} \frac{r}{w} \right) i_{1c} + \\ + \frac{a_1}{2} (i_{2c} + \sqrt{3} i_{2s}) = -a_1 \Psi_f; \\ -a_1 (\sqrt{3} i_{1c} + i_{1s}) - \left[ 2 \left( 1+l-\frac{3}{4} a_1^2 \right) \sqrt{3} + \frac{r}{w} \right] i_{2c} - \\ - \left[ 2 \left( 1+l-\frac{3}{4} a_1^2 \right) - \sqrt{3} \frac{r}{w} \right] i_{2s} + \frac{3}{2} a_1^2 (\sqrt{3} i_{4c} + i_{4s}) = 0; \\ -a_1 (i_{1c} - \sqrt{3} i_{1s}) - \left[ 2 \left( 1+l-\frac{3}{4} a_1^2 \right) - \sqrt{3} \frac{r}{w} \right] i_{2c} + \\ + \left[ 2 \sqrt{3} \left( 1+l-\frac{3}{4} a_1^2 \right) + \frac{r}{w} \right] i_{2s} + \frac{3}{2} a_1^2 (i_{4c} - \sqrt{3} i_{4s}) = 0; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \end{aligned}$$

Решение этой системы показало, что коэффициенты гармоник быстро убывают с ростом номера. При этом вычисление первых гармоник тока с достаточной точностью можно проводить без учета остальных. Приближенные значения коэффициентов первой гармоники  $i_a(\varphi)$  равны  $i_{1c}=\Psi_f j_{1c}$ ,  $i_{1s}=\Psi_f j_{1s}$ , где

$$\begin{aligned} j_{1c} &= \frac{-a_1(1+l)}{d}; \quad j_{1s} = \frac{a_1 r/w}{d}; \\ d &= \left( 1+l-\frac{3}{2} a_1^2 \right) (1+l) + (r/w)^2. \quad (\Pi-2) \end{aligned}$$

При учете только первой гармоники тока, ус-

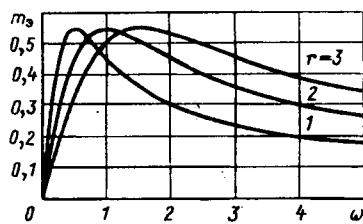


Рис. 2

редненные уравнения записываются в виде

$$\begin{aligned}\Psi'_f &= -\frac{\epsilon_f r_f}{w} \Psi_f \left(1 - \frac{3}{2} a_1 j_{1c}\right) + \frac{\epsilon_f e_f}{w}; \\ w' &= \frac{\epsilon_w}{w} \Psi_f^2 \left[ -\frac{3}{2} a_1 j_{1s} + \frac{9}{8} a_1 j_{1s} j_{1c} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{3\sqrt{3}}{8} a_1^2 (j_{1s}^2 + j_{1c}^2) \right] + \frac{\epsilon_w}{w} m. \quad (\text{П-3})\end{aligned}$$

Полученные уравнения позволяют определить зависимость среднего электромагнитного момента от угловой скорости стационарного режима. Для этого из первого уравнения при  $\Psi'_f = 0$  надо получить стационарное значение потокосцепления обмотки возбуждения  $\Psi_f(w)$  и подставить во второе. Безразмерный электромагнитный момент равен первому члену в правой части второго уравнения (П-3). Зависимость электромагнитного момента от  $w$  при разных сопротивлениях нагрузки имеет максимум, не зависящий от  $r$  (рис. 2). Построенная статическая характеристика позволяет определить момент двигателя, при котором частота вращения в стационарном режиме будет иметь заданное значение, а также определить необходимое изменение момента для сохранения частоты при изменении нагрузки. Зависимость электромагнитного момента от  $w$  показывает, что определенному моменту двигателя, меньшему, чем максимум электромагнитного момента, отвечают два возможных стационарных значения частоты. При этом меньшей частоте отвечает устойчивый, а большей — неустойчивый стационарный режим. Кроме исследования стационарного режима, был проведен расчет переходного режима при скачкообразном изменении сопротивления нагрузки. При этом для сохранения частоты работы генератора момент двигателя менялся таким образом, чтобы его новое значение

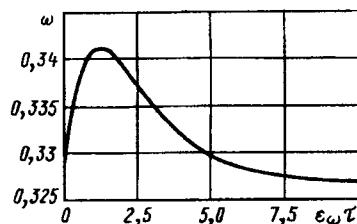


Рис. 3

соответствовало стационарному режиму той же частоты, но при новом сопротивлении нагрузки. Зависимость угловой скорости от времени в переходном режиме в случае изменения безразмерного сопротивления с  $r=1$  до  $r=3$  приведена на рис. 3.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домбур Л.Э. Аксиальные индукторные машины. — Рига: Зинатне, 1984.
2. Скубов Д.Ю., Ходжаев К.Ш. Уравнения электромеханических процессов в однофазных индукторных генераторах, работающих на активно-индуктивную нагрузку. — Электричество, 1994, № 9.
3. Власов Е.Н., Саблин А.Д., Ходжаев К.Ш. Уравнения медленных переходных процессов синхронной машины. — Электричество, 1980, № 9.
4. Киселев П.В., Ходжаев К.Ш. Усредненные уравнения переходных процессов в синхронных машинах. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1987, № 4.
5. Волосов В.М., Моргунов Б.И. Метод осреднения в теории нелинейных колебательных систем. — М.: МГУ, 1971.

[07.03.95]

*Авторы: Скубов Дмитрий Юльевич* окончил физико-механический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ) в 1980 г. В 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Динамика ротора криогеногенератора в стационарном и переходных режимах». Доцент кафедры механики и процессов управления Санкт-Петербургского государственного технического университета (СПбГТУ).

*Ходжаев Камил Шамсутдинович* окончил физико-механический факультет ЛПИ в 1961 г. В 1974 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Нелинейные задачи о равновесии и колебаниях проводящих и ферромагнитных тел». Профессор кафедры механики и процессов управления СПбГТУ.

# Создание новой российской серии асинхронных машин

МАКАРОВ Л.Н., АХУНОВ Т.А., ПОПОВ В.И.

Показаны основные принципы построения новой российской серии асинхронных машин мощностью до 100 кВт, освоенной в производстве на Ярославском электромашиностроительном заводе. Для высот оси вращения от 71 до 250 мм приведены рациональные наружные диаметры сердечников статора, полученные на основе критерия объединения нескольких высот оси вращения на одном наружном диаметре.

Ключевые слова: асинхронные машины, создание серии

Асинхронные двигатели (АД) занимают гла-венствующее положение в современном электро-приводе переменного тока благодаря простоте и технологичности конструкции, высоким энергетическим показателям и эксплуатационной на-дежности. Непрерывный рост потребности в АД и необходимость периодической смены серий де-лают актуальной задачу создания новых высо-коэффективных машин, адаптированных к совре-менным требованиям потребителей.

Асинхронные двигатели мощностью до 100 кВт составляют до 90% по количеству и до 60% по мощности их суммарного производства, по-этому создание новых серий высокоэкономичных и надежных АД таких мощностей является важной и актуальной народнохозяйственной задачей в со-временных социально-экономических условиях развития России, учитывая, что основная часть промышленного производства АД мощностью до 100 кВт осталась за рубежом, в странах СНГ.

Задача создания новых российских серий АД является комплексной и должна учитывать тенден-ции мирового развития асинхронных двигателей, базироваться на опыте разработки и выпуска пред-шествующих общесоюзных серий с учетом изме-нившихся в России экономических условий и тен-денций. При этом должны соблюдаться междуна-родные и национальные стандарты, использоваться новейшие научно-технические достижения в обла-сти электромеханики по теории, расчету и проекти-рованию электрических машин, новые электротех-нические материалы и современные технологии про-изводства, выполняться требования по эколо-гии, технической эстетике и дизайну.

Разработке новой серии АД предшествовали комплексные научно-исследовательские работы по усовершенствованию конструкции, магнитопрово-да и обмоток, расчетных методик [1-6]. Резуль-таты проведенных исследований показали пер-спективность разработки конструкций современ-ных АД, адаптированных к технологиям заво-дов-изготовителей, специализированных, как это

*New main principles of creation of a new Russian's series of asynchronous machines with a capacity of up to 100 kW manufactured at Yaroslavl' Electrical and Mechanical Plant are shown. Rational outside diameters of stator cores for the rotation axis heights of 71-250 mm are given with these diameters obtained on the basis of the criteria of combining several rotation axis heights at one outside diameter.*

Ключевые слова: асинхронные машины, новая серия

было в СССР, на выпуске лишь одного-двух га-баритов АД.

Разработанная серия АД, названная Российской (РД или РА), реализована на АО «Ярославский электромашиностроительный завод (ЯЭМЗ)» с ориентацией на привязку мощностей с высотами оси вращения по шкале «С», соответствующей стандарту CENELEK. Для высот оси вращения от  $H=71$  до  $H=250$  мм выбран оптимальный ряд наружных диаметров сердечника статора, при этом с целью ускорения освоения и сокращения издержек на подготовку производства в основу оптимизации положен критерий объединения не-скольких высот оси вращения на одном наружном диаметре. Так, например, объединены высоты: 71 и 80 мм; 80, 90 и 100 мм; 112 и 132 мм; 132 и 160 мм; 160 и 180 мм; 180, 200 и 225 мм; 200, 225 и 250 мм.

По мере освоения серии для каждой высоты оси вращения фиксировался свой наиболее тех-нически обоснованный наружный диаметр.

Первый опыт реализации такой серии на внут-реннем рынке показал техническую неподготов-ленность потребителей к ее широкому приме-нению. Поэтому для удовлетворения спроса рынка потребовалось создание в серии параллельного ряда АД с требованиями ГОСТ, т.е. с увязкой установочно-присоединительных размеров по шкале «Р». Такая работа была проведена на ЯЭМЗ достаточно безболезненно, поскольку к этому вре-мени был освоен достаточно большой набор на-ружных диаметров, на которых можно было обес-печить требуемую привязку с получением оп-тимальных характеристик машины.

Оптимизация наружных диаметров сердечни-ков статора в серии РД (см. таблицу) бази-ровалась на опыте разработки и освоения как общесоюзных единых серий АД — А, АО, А2, АО2, 4А, 4АМ и АИР, так и зарубежных серий АД по стандарту DIN. Такая оптимизация по-требовала определения внутренних диаметров сер-дечника статора для различных полюсностей, чи-

$D_H$ , мм	$H$ , мм	Мощность на валу $P_2$ (кВт) при синхронной скорости								$D_H$ , мм	
		3000 об/мин		1500 об/мин		1000 об/мин		750 об/мин			
		RA	АИР	RA	АИР	RA	АИР	RA	АИР		
120	71	<b>A 0,37</b> B 0,55	<b>A 0,75</b> B 1,10	<i>A 0,25</i> B 0,37	<i>A 0,55</i> B 0,75	<i>A 0,18</i> B 0,25	<i>A 0,37</i> B 0,55	<i>A 0,09</i> B 0,12	<i>0,25</i>	<u>116</u> <u>106</u>	
120 (140)	80	<b>A 0,75</b> B 1,10	<b>A 1,50</b> B 2,20	<i>A 0,50</i> B 0,75	<i>A 1,10</i> B 1,50	<i>A 0,37</i> B 0,55	<b>A 0,75</b> B 1,10	<i>A 0,18</i> B 0,25	<i>A 0,37</i> B 0,55	<u>131</u> <u>120</u>	
140	90	<b>S 1,50</b> L 2,20	<b>L 3,0</b>	<b>S 1,10</b> L 1,50	<b>L 2,20</b>	<b>S 0,75</b> L 1,10	<b>L 1,50</b>	<i>S 0,37</i> L 0,55	<i>LA 0,75</i> LB 1,1	<u>149</u> <u>135</u>	
150 (140)	100	<b>L 3,0</b>	<b>S 4,0</b> L 0,55	<b>LA 2,2</b> LB 3,0	<b>S 3,0</b> L 4,0	<b>L 1,5</b>	<i>L 2,2</i>	<i>LA 0,75</i> LB 1,1	<i>L 1,50</i>	<u>168</u> <u>150</u>	
170 (206)	112	<b>M 4,0</b>	<b>M 7,5</b>	<b>M 4,0</b>	<b>M 5,5</b>	<b>M 2,2</b>	<b>MA 3,0</b> MB 4,0	<b>M 1,5</b>	<b>MA 2,2</b> MB 3,0	<u>191</u> <u>170</u>	
206	132	<b>SA 5,5</b> SB 7,5	<b>M 11,0</b>	<b>S 5,5</b>	<b>S 7,5</b>	<b>S 3,0</b> MA 4,0 MB 5,5	<b>S 5,5</b>	<b>S 2,2</b>	<b>S 4,0</b>	<u>225</u> <u>206</u>	
273	160	<b>MA 11,0</b> MB 15,0 L 18,5	<b>S 15,0</b>	<b>M 11,0</b>	<b>S 15,0</b>	<b>M 7,5</b>	<b>S 11,0</b>	<b>MA 4,0</b> MB 5,5 L 7,5	<b>S 7,5</b>	<u>260</u> <u>255</u>	
296 (273)	180	<b>M 22,0</b>	<b>S 22,0</b> M 30,0	<b>M 18,5</b> L 22,0	<b>S 22,0</b> M 30,0	<b>L 15,0</b>	<b>M 18,5</b>	<b>L 11,0</b>	<b>M 15,0</b>	<u>295</u> <u>288</u>	
296	200	<b>LA 30,0</b> LB 37,0	<b>M 37,0</b> L 45,0	<b>L 30,0</b>	<b>M 37,0</b> L 45,0	<b>LA 18,5</b> LB 22,0	<b>M 22,0</b> L 30,0	<b>L 15,0</b>	<b>M 18,5</b> L 22,0	<u>327</u> <u>322</u>	
340 (296)	225	<b>M 45,0</b>	<b>M 55,0</b>	<b>S 37,0</b> M 45,0	<b>M 55,0</b>	<b>M 30,0</b>	<b>M 37,0</b>	<i>S 18,5</i> M 22,0	<b>M 30,0</b>	<u>368</u> <u>362</u>	
400 (340)	250	<b>M 55,0</b>	<b>S 75,0</b> M 90,0	<b>M 55,0</b>	<b>S 75,0</b> M 96,0	<b>M 37,0</b>	<b>S 45,0</b> M 55,0	<b>M 30,0</b>	<b>S 37,0</b> M 45,0	<u>420</u> <u>410</u>	
400	280	<b>S 75,0</b> M 90,0	<b>S 110,0</b> M 132,0	<b>S 75,0</b> M 90,0	<b>S 110,0</b> M 132,0	<b>S 45,0</b> M 55,0	<b>S 75,0</b> M 90,0	<b>S 37,0</b> M 45,0	<b>S 55,0</b> M 75,0	<u>480</u> <u>465</u>	

Примечания: жирным шрифтом отмечены мощности, освоенные на ЯЭМЗ к середине 1995 г., курсивом — в стадии освоения; в последнем столбце показаны наружные диаметры  $D_H$  сердечников статора АД серии АИР (над чертой) и по DIN (под чертой).

сел пазов статора и ротора, длин сердечников, поиска рациональной внутренней геометрии магнитопровода с целью получения высоких технико-экономических показателей на уровне международных стандартов, удовлетворения требований высокой технологии (минимальной себестоимости) при серийном производстве.

При разработке серии RA учитывались требования внешнего и внутреннего рынков, а именно:

получение вибро-акустических характеристик АД, удовлетворяющих запросам самого изысканного потребителя (снижение до минимума шумов магнитного, механического от подшипников и вентиляции);

улучшение пусковых характеристик — увеличение моментов при снижении кратности пускового тока;

увеличение конкурентоспособности за счет улучшения технической эстетики, дизайна и внешней отделки (отработка единого стиля для АД всех высот оси вращения; цветовая отделка специально разработанной матовой краской воздушной сушки, удовлетворяющей категории размещения до Т2);

получение высоких энергетических характеристик при снижении массы и улучшении компактности;

простота обслуживания, повышение экономичности в производстве и эксплуатации;

технологичность, высокая степень унификации, снижение трудоемкости и, что особенно важно в условиях спада экономики, достижение минимальных цен;

снижение сроков освоения (АД некоторых высот серии RA осваивались на ЯЭМЗ менее чем за 1,5 мес.);

создание АД специализированных исполнений и модификаций (помимо общезвестных) при широкой унификации деталей, узлов и технологических процессов: двухскоростных для привода лифтов; трехфазных для параметрического регулирования частоты вращения; преобразователей частоты (одномашинных асинхронного типа); с внешним ротором; однофазных для бытовой техники; асинхронных генераторов для передвижных установок и ветроагрегатов; двигателей и генераторов постоянного тока на базе конструкции АД;

создание такой структуры осваиваемой серии,

которая позволяет дальнейшее усовершенствование с учетом возрастающих требований национальных и международных стандартов, потребителей и рынка.

В разработанной серии предусмотрена возможность получения машин предельных габаритов, например, при высоте оси вращения  $H=200$  мм в габарите высоты  $H=160$  мм (по требованию заказчика).

Выполнение такого широкого объема работ потребовало проведения специальных исследований с целью подбора оптимальных размеров пазовой зоны ротора—статора, снижения добавочных потерь и магнитных шумов, выбора и разработки усовершенствованных и новых типов трехфазных обмоток с целым и дробным числом пазов на полюс и фазу, обладающих пониженным уровнем дифференциального рассеяния, применения на короткозамкнутом роторе пазов специальных форм и чередующихся пазов, выбора материалов и создания принципиально новых технологий производства АД, разработки новых методик электромагнитных расчетов и экспериментальных исследований, создания и внедрения на ЯЭМЗ системы автоматизированного проектирования (САПР) асинхронных машин.

Использование разработанных заводом новых расчетных, конструкторских и технологических решений позволило существенно улучшить показатели как машин основного исполнения, так и их модификаций.

При создании конструкции асинхронных машин новой серии учитывался опыт разработки и освоения на ЯЭМЗ в разные годы единых серий асинхронных машин, начиная с серий А, АО, А2, АО2 — шестого габарита, 4А, 4АМ — высоты оси вращения  $H=160$  мм и серии АИР той же высоты.

В конструкции АД новой серии предусмотрены как чугунные, так и алюминиевые станины. Станины всех габаритов серии имеют горизонтально-вертикальное оребрение с уменьшенным шагом и увеличенной высотой ребра, что позволяет увеличить поверхность охлаждения и повысить степень использования активных материалов. Все типоразмеры серии имеют станину со съемными лапами и фланцем, что дает возможность потребителю использовать двигатель универсально, т.е. иметь коробку выводов сверху, справа или слева; исполнения 1М1001, 1М2001, 1М3001 фактически можно получать в новой серии на одном двигателе.

Для двигателей с высотами оси вращения от  $H=71$  мм до  $H=160$  мм предусмотрена экструзионная станина из специального алюминиевого сплава, обладающего высокими механиче-

ской прочностью и теплопроводностью. Применение такой станины снижает шумы и увеличивает КПД машины за счет применения вентиляторов уменьшенного диаметра, а также уменьшает массу машины.

Весь комплекс работ по разработке и освоению новой серии был проведен в основном в течение 1992—1994 гг. и как целостная программа будет завершен к середине 1996 г. Создание и освоение новой серии асинхронных машин мощностью до 100 кВт решает важную народнохозяйственную проблему дальнейшего развития электромашиностроения в России.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Л.Н. Совершенствование асинхронных электродвигателей и перспективы создания новых серий / Тез. докл. научн. техн. конф. по проблемам электромеханики. — Ленинград, 1991.
2. Макаров Л.Н. Основные соотношения размеров чередующихся пазов при оптимизации роторов асинхронных электродвигателей / Там же.
3. Патент России № 1830168. Ротор асинхронного электродвигателя / Л.Н. Макаров. — Опубл. в Б.И., 1993, № 27.
4. Макаров Л.Н., Ахунов Т.А., Попов В.И. Перспективы развития асинхронных двигателей в России / Тез. докл. I Международной конференции по электромеханике и электротехнологии (I МКЭЭ). — Сузdalь, 1994, ч. 2.
5. Разработка отрезка серии трехфазных двухскоростных лифтовых асинхронных двигателей / Л.Н. Макаров, Т.А. Ахунов, В.И. Попов, Ю.Н. Петров. — Электротехника, 1995, № 3.
6. Разработка асинхронных одномашинных преобразователей частоты ОПЧС-50/200 Гц / Л.Н. Макаров, Т.А. Ахунов, В.И. Попов, Ю.Н. Петров. — Электротехника, 1995, № 3.

*Авторы: Макаров Лев Николаевич окончил электромеханический факультет Ивановского энергетического института в 1961 г. В 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию по машинам постоянного тока с разомкнутой обмоткой якоря во Всесоюзном заочном политехническом институте. Начальник научно-инженерного центра АО «Ярославский электромашиностроительный завод (ЯЭМЗ)».*

*Ахунов Турсын Абдалимович окончил факультет турбостроения Ленинградского политехнического института в 1962 г. Генеральный директор АО ЯЭМЗ.*

*Попов Виктор Иванович окончил электротехнический факультет Ереванского политехнического института в 1962 г. В 1986 г. в Московском энергетическом институте защитил докторскую диссертацию по электромашинным преобразователям энергии с совмещенными обмотками. Главный научный сотрудник и руководитель научно-исследовательской лаборатории электромеханики Волжского инженерно-педагогического института (Нижний Новгород).*

# К расчету параметров схемы замещения магнитной цепи ярем статора и ротора неявнополюсной синхронной машины

ТЕСЛЕНКО О.А., ШИРИНСКИЙ С.В.

В статье рассмотрен вопрос уточнения эквивалентной схемы замещения магнитной цепи ярма статора неявнополюсной синхронной машины, формируемой на основе метода проводимостей зубцовых контуров (МПЗК), и рекомендована методика расчета характеристик намагничивания составляющих схему элементов. Методика позволяет учесть существенную кривизну ярма и обеспечивает высокий уровень точности расчета. В качестве эталона использовались результаты численного моделирования поля в ярме статора. Приведены погрешности аналитического расчета при различных уровнях насыщения. Показана непригодность аналогичной схемы замещения для моделирования магнитной цепи ярма ротора.

**Ключевые слова:** турбогенераторы, магнитная цепь, схема замещения, расчет

Неявнополюсные синхронные машины (прежде всего турбогенераторы) имеют ряд особенностей конструкции активной зоны, отличающих их от других типов электрических машин.

При расчетах магнитной цепи методом зубцовых контуров<sup>1</sup> ярма статора и ротора электрических машин традиционно замещают одним слоем тангенциальных элементов, предполагая при этом, что и основное поле в ярме направлено тангенциально. Для ярм турбогенератора такое допущение будет слишком грубым. Реально магнитное поле в ярме при существенной кривизне ярма будет иметь как тангенциальную, так и радиальную составляющие.

На рис. 1, а показана картина магнитного поля в ярме статора турбогенератора, полученная в результате численного моделирования этого поля методом конечных элементов при синусоидальном возбуждении внутренней поверхности. Ввиду симметрии моделировалась лишь четверть периода поля.

Картина поля в ярме ротора еще более далека от традиционных допущений (рис. 2). Она также получена в результате численного моделирования поля методом конечных элементов при синусоидальном возбуждении наружной поверхности. Моделирование проводилось на четверти периода изменения поля. Как видно из рис. 2, поле в ярме ротора было бы практически равномерным, если бы не незначительное влияние центрального отверстия. При этом на одних участках поле

*The paper considers a problem of the more precise design of an equivalent circuit for a stator yoke magnetic circuit of non-salient synchronous machine on the basis of the tooth contours permeabilities method. A method for calculation of magnetization characteristics of the equivalent circuit components is proposed. This method allows for the significant curvature of a stator yoke and ensures a high levee of calculation accuracy. As a reference results of numerical modelling of a stator yoke magnetic field have been used. Calculation errors for different saturation levels are presented. It is shown that the analogous equivalent circuit is not suitable to modelling a rotor yoke magnetic circuit.*

**Ключевые слова:** турбогенераторы, магнитная цепь, схема замещения, расчет

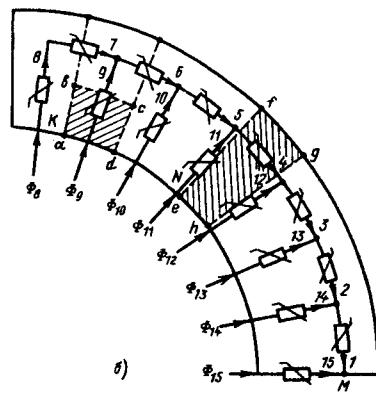
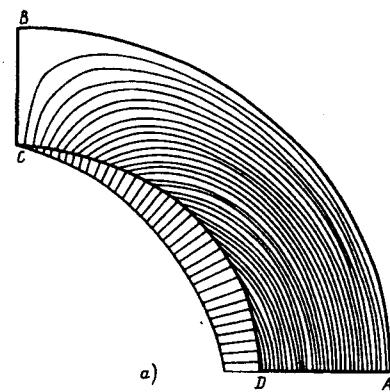


Рис. 1

направлено практически тангенциально, на других — радиально. Это усложняет составление эквивалентной схемы замещения и определение параметров составляющих ее элементов.

Схема замещения магнитной цепи ярма статора должна содержать радиальные и тангенциальные элементы. Число элементов определяется

<sup>1</sup> Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В., Власов А.И., Кузнецов В.А. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах. — М.: Энергоатомиздат, 1986.

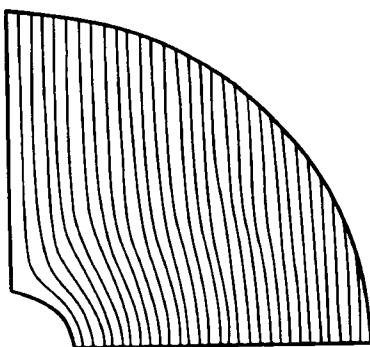


Рис. 2

числом зубцов. На рис. 1,б представлен фрагмент полной схемы замещения, соответствующий четверти поля турбогенератора. Схема составлена из тангенциальных и радиальных нелинейных магнитных проводимостей элементов ярма, соответствующих зубцовому делению ( $\Lambda_{a1\tau}$  и  $\Lambda_{a1\tau}$ ). Для упрощения принято  $Z_1 = 30$  (в пределах четверти периода на статоре помещается  $30/4 = 7,5$  зубцовых делений), при этом угловой размер зубцового деления равен  $\alpha_{Z1} = 2\pi/Z_1$ .

Каждый элемент схемы замещения представлен нелинейной характеристикой намагничивания — зависимостью магнитного потока через элемент в соответствующем направлении от магнитного напряжения этого элемента:  $\Phi = f(U_m)$ . Характеристику намагничивания для радиально направленного поля находят для элемента *abcd* (рис. 1,б). Тангенциальный размер элемента равен зубцовому делению (пропорционально радиусу), а радиальный размер  $h_{r1}$  подлежит определению. При первых расчетах им приходится задаваться. Для тангенциально направленного поля характеристику намагничивания находят для элемента *efgh* (рис. 1,б). Радиальный размер этого элемента равен высоте ярма, а угол  $\alpha_{Z1\tau}$  между эквипотенциальными *ef* и *hg* подлежит определению. При первых расчетах им также приходится задаваться.

Для определения заранее не известных радиального размера  $h_{r1}$  и угла  $\alpha_{Z1\tau}$  необходимо провести серию расчетов магнитных напряжений в ярме при возбуждении схемы по рис. 1,б синусоидально распределенными потоками  $\Phi$  ( $\Phi_8, \Phi_9, \dots, \Phi_{15}$ ). А найденные таким образом магнитные напряжения сопоставить с эталонными результатами численного моделирования.

Для численных расчетов использовалась интерактивная система конечноэлементного моделирования двумерных магнитных полей. Моделирование проводилось для ярма статора турбогенератора (200 МВт;  $U_{1\text{H}} = 15750$  В;  $\cos\varphi = 0,85$ ;  $2p = 2$ ;  $f = 50$  Гц) на четверти периода изменения магнитного поля. При этом на границах

*AB*, *СД* и *ДА* (рис. 1,а) задавались граничные условия Дирихле, а на границе *BC* — условие Неймана. Для воспроизведения магнитного поля в ярме, близкого к реальному, на одной из границ Дирихле (*CD*) задавалось синусоидальное распределение векторного магнитного потенциала  $A = A_m \sin(\theta)$ , а на остальных границах Дирихле  $A = 0$ . Амплитуду изменения векторного магнитного потенциала  $A_m$  на возбужденной поверхности выбирали так, чтобы обеспечить определенное среднее значение индукции в ярме  $B_a$  на оси симметрии (линия *BC*). Было проведено несколько расчетов при  $B_a = 1,0; 1,2; 1,4$  и  $1,6$  Тл. Картина магнитного поля на рис. 1,а построена программой конечноэлементного моделирования на основании результатов численного расчета поля при  $B_a = 1,6$  Тл. По результатам численного моделирования были проведены расчеты распределения скалярного магнитного потенциала на возбужденной поверхности, а также найдено полное магнитное напряжение ярма.

Для определения неизвестных заранее радиального размера  $h_{r1}$  и угла  $\alpha_{Z1\tau}$  можно составить два нелинейных уравнения для магнитных напряжений: одно — для полного магнитного напряжения на моделируемой четверти периода изменения поля, т.е. между узлами *K* и *M* на рис. 1,б:

$$U_{KM} - U_{KM}(\alpha_{Z1\tau}; h_{r1}) = 0, \quad (1)$$

другое — для магнитного напряжения примерно на  $1/8$  периода изменения поля, т.е. между узлами *K* и *N* на рис. 1,б:

$$U_{KN} - U_{KN}(\alpha_{Z1\tau}; h_{r1}) = 0. \quad (2)$$

Здесь  $U_{KM}, U_{KN}$  — магнитные напряжения между соответствующими узлами, найденные путем численного моделирования поля (эталонные);  $U_{KM}(\alpha_{Z1\tau}; h_{r1}), U_{KN}(\alpha_{Z1\tau}; h_{r1})$  — аналогичные магнитные напряжения, найденные путем расчета схемы замещения по рис. 1,б. Причем синусоидально распределенные потоки в схеме замещения должны обеспечивать такое же значение средней индукции на оси симметрии поля, что и при численном моделировании ( $B_a = 1,0; 1,2; 1,4$  и  $1,6$  Тл).

В результате решения системы двух нелинейных уравнений (1) и (2) относительно  $\alpha_{Z1\tau}$  и  $h_{r1}$  для каждого случая намагничивания, характеризующегося значением средней индукции  $B_a$ , найдены такие значения  $\alpha_{Z1\tau}$  и  $h_{r1}$ , при которых падения напряжения в ярме, найденные путем численного моделирования поля и путем расчета схемы замещения, совпадали с точностью не менее  $0,1\%$ . Для возможности распространения полученных результатов на другие двухполюсные

машины результаты определения  $\alpha_{Z1*}$  и  $h_{r1*}$  целесообразно представлять в относительной форме:

$$\alpha_{Z1*} = \alpha_{Z1r}/\alpha_{Z1}; \quad h_{r1*} = h_{r1}/h_{a1},$$

где  $\alpha_{Z1}$  — действительный угловой размер зубцового деления статора;  $h_{a1}$  — полная высота ярма статора.

Результаты расчетов представлены в табл. 1, из которой видно, что оптимальное значение  $\alpha_{Z1*}$  в отличие от  $h_{r1*}$  изменяется в небольших пределах для разных уровней насыщения. Поэтому решено было зафиксировать значение  $\alpha_{Z1*}$  и повторить для него подбор оптимальных  $h_{r1*}$ . Результаты этих расчетов приведены в средней части табл. 1. Диапазон изменения  $h_{r1*}$  при этом несколько увеличился. За окончательно рекомендуемые значения  $\alpha_{Z1*}$  и  $h_{r1*}$  следует принять значения, соответствующие типичной индукции в ярме статора примерно  $B_a = 1,4$  Тл:

$$\alpha_{Z1*} = 0,88; \quad h_{r1*} = 0,01.$$

Завершая выбор  $\alpha_{Z1*}$  и  $h_{r1*}$ , нужно оценить погрешности в магнитных напряжениях, которые будут возникать при принятых  $\alpha_{Z1*}$  и  $h_{r1*}$ , если их использовать не при индукции  $B_a = 1,4$  Тл, а при других возможных значениях индукций ( $B_a = 1,2-1,6$  Тл).

Погрешности при расчете напряжений на 1/4 и 1/8 периода изменения поля приведены в нижней части табл. 1. Кроме того, на рис. 3 можно сравнить распределения скалярных магнитных потенциалов вдоль возбужденной поверхности ярма статора, найденных из расчета схемы замещения (показаны отдельные точки), с результатами численного моделирования (сплошные линии) для различных индукций в ярме статора. Из рис. 3 видно, что схема замещения, представленная на рис. 1,б, параметры которой рассчитаны в соответствии с рекомендованными значениями  $\alpha_{Z1*}$  и  $h_{r1*}$ , хорошо воспроизводит не только полное падение магнитного напряжения в ярме, но и распределение скалярных магнитных потенциалов вдоль ярма.

Таблица 1

Параметры	Значения $B_a$ , Тл			
	1,0	1,2	1,4	1,6
$\alpha_{Z1*}$	0,924	0,917	0,880	0,858
$h_{r1*}$	0,260	0,028	0,01	0,001
$\alpha_{Z1*} = 0,88$	—	—	—	—
$h_{r1*} = 0,01$	0,619	0,167	0,01	0,001
$\alpha_{Z1*} = 0,88;$ $h_{r1*} = 0,01$	—	—	—	—
$\Delta U_{m1/4}, \%$	-8,1	-4,2	+0,04	+2,5
$\Delta U_{m1/8}, \%$	-9,6	-4,5	+2,7	+14,5

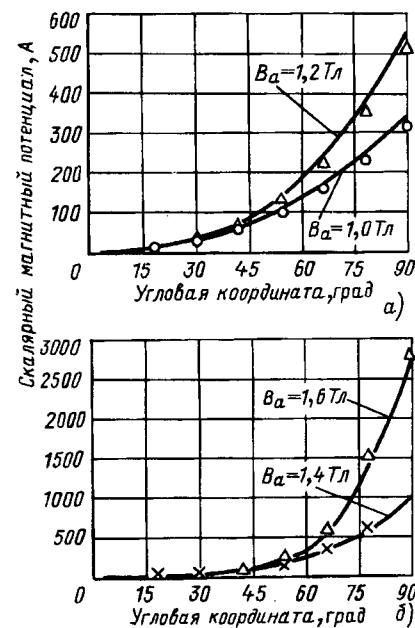


Рис. 3

Что касается магнитной цепи ярма ротора, то для нее была проведена аналогичная процедура: выполнено несколько численных расчетов с различными уровнями насыщения, составлена схема замещения, основанная на тех же принципах, что и для ярма статора, и для каждого уровня насыщения решена система из двух уравнений для магнитных напряжений на 1/4 и 1/8 периода изменения поля.

Единственным отличием было то, что характеристики намагничивания для радиально и тангенциально напряженного поля определялись не для элементов в форме сегмента (как для статора, рис. 1,б), а для элементов прямоугольной формы (в соответствии с реальной картиной магнитного поля — рис. 2).

Результаты расчетов представлены в табл. 2. Для ярма ротора оказалось, что оптимальные значения  $h_{r2*}$  слабо изменяются с увеличением средней индукции в ярме, зато оптимальные значения  $\alpha_{Z2*}$  изменяются очень заметно. При этом оказалось невозможным выбрать единственную пару значений  $\alpha_{Z2*}$  и  $h_{r2*}$ , одинаково пригодную для использования при всех возможных значениях индукций. Так, если считать опорной индукцией в ярме ротора турбогенератора значение  $B_a = 2,0$  Тл и выбрать соответственно  $\alpha_{Z2*} = 0,22$  и  $h_{r2*} = 0,07$ , то для остальных индукций погрешности расчета магнитных напряжений оказываются слишком велики (см. нижнюю часть табл. 2).

Была сделана попытка использовать более разветвленную схему замещения, содержащую не один, а два слоя радиальных и тангенциальных

Таблица 2

Параметры	Значения $B_a$ , Тл			
	1,4	1,6	1,8	2,0
$\alpha_{Z2*}$	0,686	0,693	0,528	0,213
$h_{r2*}$	0,0836	0,0466	0,0614	0,0926
$\alpha_{Z2*} = 0,22$ ; $h_{r2*} = 0,07$	—	—	—	—
$\Delta U_{m1/4}$ , %	-64,4	-63,6	-54,8	+1,38
$\Delta U_{m1/8}$ , %	-57,7	-47,1	-32,8	-16,8

элементов (рис. 4). Но результат при этом практически не изменился. Окончательно (или до получения новых результатов) можно рекомендовать при необходимости точного учета распределения магнитного поля в ярме ротора использовать численное моделирование с минимально необходимым числом узлов. Например, при моделировании методом конечных разностей в полярных координатах достаточно использовать сетку, разбивающую ярмо по высоте на пять слоев и каждый слой на две части в каждом зубцовом делении. Число узлов при этом равно  $6 \times 2 \times Z_2$ .

{27.06.94}

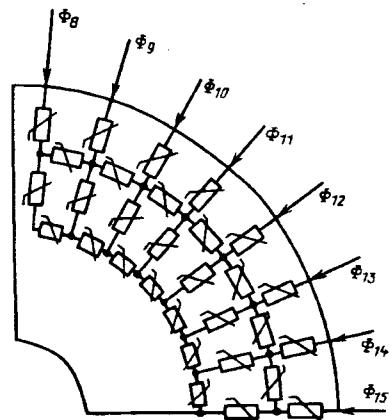


Рис. 4

Авторы: Тесленко Оксана Александровна окончила Московский энергетический институт (МЭИ) в 1993 г. по специальности электромеханика. Аспирантка МЭИ.

Ширинский Сергей Владимирович окончил МЭИ в 1989 г. по специальности электромеханика. В 1993 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка маховичного вентильного автономного генератора». Ассистент кафедры электромеханики МЭИ.

## Многомерная оптимизация параметров двукратно интегрирующих цифроаналоговых систем электропривода

КЛЕПИКОВ В.Б., ГУЛЬ А.И.

Предложены новый критерий многопараметрической оптимизации и методика наладки двукратно интегрирующих систем электропривода высокой точности, улучшающие их динамические и точностные характеристики и упрощающие точность регулирования на действующем оборудовании с полным исключением измерений величин и расчетов.

Ключевые слова: электропривод, двукратно интегрирующие системы, многомерная оптимизация

**Постановка задачи.** Многие цифроаналоговые системы автоматического регулирования электропривода выполняются двукратно интегрирующими с целью достижения астатизма как по управляющему, так и по возмущающим воздействиям. При повышенных требованиях к динамической ошибке таких систем актуальна за-

*The paper presents a new criterion for multiparametric optimization and a method for adjusting double-integrating electric drive systems of high precision which make it possible to improve their dynamic and precision characteristics, simplify a fine control in operating equipment and completely eliminate value measurements and calculations.*

**Key words:** *electric drive, double-integrating systems, multimeasure optimization*

дача многомерной параметрической оптимизации на максимум контурного коэффициента усиления при заданном показателе колебательности. В известных методиках синтеза параметры регулятора или не соответствуют вышеуказанному критерию [1, 2] или же определены только для аналоговых систем подчиненного регулирования (СПР) по

математической модели объекта регулирования [3]. Поскольку параметры модели определяются с некоторой погрешностью, а параметры системы электропривода дрейфуют, представляет интерес разработка методик практического поиска оптимальных значений непосредственно на действующем оборудовании без процедуры идентификации параметров объекта регулирования и последующих уставок расчетных значений параметров регулятора. Решение такой задачи возможно при существовании экстремальных значений выходной координаты системы в процессе варьирования ее параметров. Доказательство существования этого условия в двукратно интегрирующих системах начнем с рассмотрения поверхности равного уровня усиления в пространстве параметров амплитудной частотной характеристики (АЧХ).

**Модель в пространстве параметров АЧХ.** Аналитическое выражение желаемой дискретной частотной характеристики разомкнутой двукратно интегрирующей СПР с настроенным по модульному оптимуму подчиненным контуром согласно общей методике синтеза [2] имеет вид

$$W_{\text{ж}}(j\lambda) = (\lambda_c/j\lambda T_a)(T_a + 1/j\lambda) W_{\text{в}}(j\lambda), \quad (1)$$

где  $\lambda$  — псевдочастота;  $\lambda_c$  — псевдочастота среза асимптотической ЛАЧХ;  $1/T_a$  — низкочастотное сопряжение асимптотической ЛАЧХ;

$W_{\text{в}}(j\lambda) = (1 - j\lambda T/2)[1 + j\lambda(T/2 - \Sigma T_{\mu})][1 + j\lambda(T/2 - T_{\mu})]/(1 + j\lambda T/2)^2$  — высокочастотная часть АЧХ;  $\Sigma T_{\mu}$  — сумма малых постоянных времени в контуре;  $T_{\mu}$  — время вычислений к такту;  $T$  — время такта повторения вычислений.

Эта методика применима при условии

$$\lambda_c < 2/T < 1/T_{\mu}, \quad (2)$$

где  $T_{\mu}$  — малые постоянные времени в контуре.

Для внешнего контура СПР условие (2), как правило, выполняется рациональным выбором частоты тактового генератора управляющей ЭВМ и ее микросхемной элементной базы.

Для исследования систем в обобщенном виде введем базовое время  $T_b$  по формуле

$$T_b = \Sigma T_{\mu} + T/2 + T_{\mu}. \quad (3)$$

Тогда дискретная амплитудная частотная характеристика замкнутой системы в относительных единицах (о.е.) согласно (1) и (3) имеет следующий вид:

$$|\Phi(j\nu)| = |1/[1 - \nu^2/W_{\text{в}}(j\nu)(1 + j\nu b)]|, \quad (4)$$

где  $\nu = \lambda T_b$  — псевдочастота, о.е.;  $k = \lambda_c (T_b)^2/T_a$  — контурный коэффициент усиления, о.е.;  $b = T_a/T_b$  — параметр низкочастотного сопряжения

ЛАЧХ, о.е.;  $\tau = T/T_b$  — время такта повторения вычислений  $T$ , о.е.;  $\tau_{\mu} = T_{\mu}/T_b$  — время вычислений  $T_{\mu}$  в долях  $T_b$ ;  $\tau_{\mu} = \Sigma T_{\mu}/T_b$  — сумма малых постоянных времени  $\Sigma T_{\mu}$  в контуре в долях  $T_b$ ;  $W_{\text{в}}(j\nu) = (1 - j\nu\tau/2)[1 + j\nu(\tau/2 - \tau_{\mu})][1 + j\nu(\tau/2 - \tau_{\mu})]/(1 + j\nu\tau/2)^2$  — высокочастотная часть АЧХ, о.е.

**Формулировка критериев оптимизации.** Как правило, двукратно интегрирующие системы настраиваются колебательными в пределах задания контурного коэффициента усиления  $0,07 < k < 0,16$  и показателем колебательности  $1,3 < M < 2$ . При заданном значении  $k = \text{const}$  выражение (4) является функцией двух переменных  $\nu$  и  $b$  и может быть наглядно изображено в трехмерном пространстве в виде поверхности равного уровня усиления, представленной на рис. 1 двумя проекциями:  $a$  — на плоскости «амплитуда—частота»;  $b$  — на плоскости «амплитуда—параметр низкочастотного сопряжения». В среднечастотной области эта поверхность имеет характерный седлообразный вид. При разных уровнях задания коэффициента усиления  $k$  «седловая» точка с координатами  $(M_0, b_0, \nu_0)$  располагается на некоторой кривой, обозначенной на проекциях штрихпунктиром. При  $k = \text{const}$ ,  $b = \text{const}$ ,  $\nu = \text{var}$  функция (4) является амплитудной частотной характеристикой замкнутой системы, максимум которой есть показатель колебательности системы  $M = \max |\Phi(j\nu)|$ . В «седловой» точке показатель колебательности  $M$  имеет минимальное значение  $M_0 = \min \{ \max |\Phi(j\nu)| \}$ .

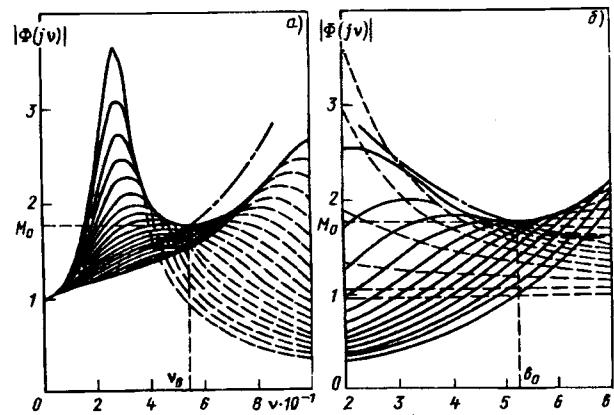


Рис. 1. Проекции поверхности равного уровня усиления:  $a$  — на плоскости «амплитуда—частота»;  $b$  — на плоскости «амплитуда—параметр»

Возможна постановка обратной задачи, когда выбирается такое значение контурного коэффициента  $k = k_0$ , при котором соответствующая поверхность равного уровня коэффициента усиления коснется своей «седловой» точкой плоскости заданного уровня показателя колебательности  $M_0 = M_{\text{зад}}$ . Найденное таким образом значение кон-

турного коэффициента усиления будет максимальным  $k_0 = \max\{k\}$  при заданном уровне показателя колебательности  $M_0 = M_{\text{зад}}$ , а низкочастотное сопряжение желаемой ЛАЧХ оптимального вида определится соответствующим значением координаты «седловой» точки  $b = b_0$ .

В «седловой» точке максимально ослаблено противоречие между добротностью и колебательностью замкнутой системы, и поэтому при постановке как прямой, так и обратной задач ее координаты соответствуют оптимальным значениям параметров системы. С помощью персонального компьютера и методов математического программирования значения  $k_0$  и  $b_0$  могут быть определены с любой наперед заданной точностью при любой сложности дискретной частотной характеристики (4). Многочисленными исследованиями установлено существование единственной «седловой» точки на поверхности равного уровня усиления двукратно интегрирующих колебательных систем одномассового электропривода при любых передаточных функциях малых звеньев, определяющих вид ЛАЧХ справа от частоты среза без резонансных выбросов. Таким образом, предлагаемые критерии и методы оптимизации применимы ко всем двукратно интегрирующим системам автоматического регулирования одномассового электропривода.

**Методика расчета начальной настройки.** Для цифроаналоговых двукратно интегрирующих систем подчиненного регулирования можно рекомендовать следующую инженерную методику расчета оптимальных значений параметров регулятора внешнего контура. В областях задания  $1,3 < M < 2$ ,  $0 < \tau < 1$  и  $0 < \tau_\mu < 1$  по модели [4] методами математического программирования найден ряд оптимальных значений  $k_0$  и  $b_0$  и по этим точкам методами регрессионного анализа определены следующие аппроксимирующие выражения:

$$b_0 = 1,9/(1-1/M), \quad k_0 = 0,74/(b_0)^{1,16}. \quad (5)$$

Оптимальные значения параметров  $\lambda_c$  и  $T_a$  в желаемой импульсной частотной характеристике (1) могут быть получены расчетом по следующим выражениям:

$$\lambda_c = b_0 k_0 / T_6; \quad T_a = b_0 T_6. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) верны как при  $2/T \gg T_{\mu i}$ , так и для чисто аналоговых СПР при условии расчета базового времени по формуле (3) с нулевыми значениями  $T$  и  $T_i$ .

Максимальное значение добротности  $D$  по ускорению двукратно интегрирующей СПР пропорционально максимальному значению контурного коэффициента усиления  $k_0$  и обратно пропор-

ционально квадрату базового значения времени  $T_6$ :

$$\max D = k_0 / (T_6)^2. \quad (7)$$

Вышеприведенный критерий и машиноориентированный метод применимы и для оптимизации СПР с сокращенным числом подчиненных контуров и компенсационными регуляторами, имеющих повышенную добротность от уменьшения значения  $T_6$  согласно (3) и (7).

**Методика точной наладки.** Сравнительный анализ предлагаемой методики многомерной параметрической оптимизации с традиционной методикой синтеза на заданный запас устойчивости по показателю колебательности [2] показал, что обе методики расчета дают значения параметров в пределах 10%-ного отклонения от «седловой» точки поверхности равного уровня усиления в пространстве параметров. При этом традиционная методика дает отклонение в связи с отсутствием в ней постановки оптимизационной задачи, а предлагаемая инженерная методика расчета в связи с ее приближенностью.

Приведенная в [1] методика оптимизации многократно интегрирующих систем на минимум колебательности при фиксированных значениях низкочастотных сопряжений ЛАЧХ с вариацией только лишь одного контурного коэффициента усиления является продуктом одномерной параметрической оптимизации. Предлагаемая методика содержит процедуру оптимизации на минимум колебательности при заданном значении контурного коэффициента усиления с обратно пропорциональной вариацией низкочастотного сопряжения и частоты среза ЛАЧХ. Являясь многомерной по существу, она представляет возможность уточнения параметров регулятора в процессе наладки непосредственно на реальном оборудовании вариацией одного коэффициента в цифровом регуляторе или одного подстроекного элемента в аналоговом регуляторе с полным исключением расчетов. Более того, согласно теории автоматического управления существованию минимума показателя колебательности должно сопутствовать существование минимума перерегулирования переходной характеристики системы, определение которой в наладке проще, чем АЧХ. Соответствующие исследования двукратно интегрирующей микропроцессорной системы подчиненного регулирования скорости были произведены на стенде реверсивного тиристорного электропривода постоянного тока с прямым цифровым управлением, разработанного фирмой «Сименс». В семействе переходных характеристик (кривые 1÷5, рис. 2), полученных при (60, 40, 20, 0, -20)%-ных отклонениях коэффициента усиления пропорциональной слагаемой ПИ-регуля-

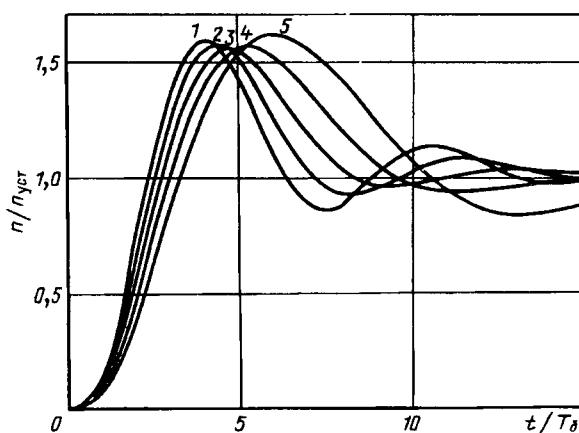


Рис. 2. Семейство переходных характеристик скорости при вариации пропорциональной слагаемой ПИ-регулятора

тора скорости от типового значения по симметричному оптимуму (кривая 4) и постоянству соответствующего типового значения коэффициента передачи интегральной слагаемой, отчетливо выделяется характеристика (кривая 3) с минимальным перерегулированием и пониженной колебательностью.

**Примеры точной наладки.** В настоящее время в эксплуатации находятся цифроаналоговые системы подчиненного регулирования положения, в которых подчиненный двукратно интегрирующий контур скорости выполнен полностью аналоговым и традиционно настроен на симметричный оптимум [4]. На схеме рис. 3,а:  $D$  — электродвигатель постоянного тока;  $ВП$  — управляемый вентильный преобразователь;  $ТГ$  — тахогенератор;  $РТ$  — регулятор тока;  $РС$  — регулятор скорости;  $ЗИ$  — задатчик интенсивности;  $РП$  — аналоговая часть регулятора положения;  $ДП$  — многоразрядный цифровой датчик положения;  $ПК$  — преобразователь кода в число;  $АУ$  — арифметическое устройство;  $УВЗ$  — цифровое устройство ввода задания;  $ПКН$  — преобразователь код—напряжение. Типовой ПИ-регулятор скорости  $РС$  реализован на операционном усилителе с резисторно-емкостной обратной связью (рис. 3,б). Улучшение динамических и точностных характеристик контура скорости может быть достигнуто вариацией сопротивления переменного резистора  $R_0$  в резисторно-емкостной обратной связи этого операционного усилителя и наблюдением переходных характеристик скорости на осциллографе с послесвечением, аналогичных семейству — см. рис. 2. Такая настройка уменьшает перерегулирование скорости до минимума при неизменном контурном коэффициенте усиления (рис. 4, кривая 2, кривая 1 — традиционная настройка на симметричный оптимум). Это обстоятельство позволяет увеличивать

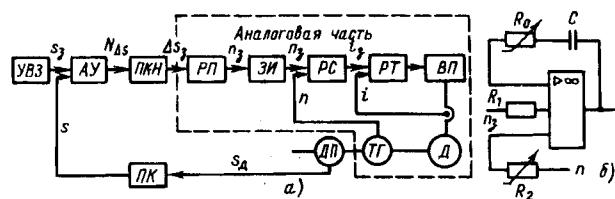


Рис. 3. Цифроаналоговая СПР положения: *а* — функциональная схема; *б* — электрическая схема ПИ-регулятора скорости

контурный коэффициент усиления (например, уменьшением сопротивления переменного резистора  $R_2$  на входе ПИ-регулятора по обратной связи от измерителя скорости — см. рис. 3,б) и повторять процедуру минимизации перерегулирования при повышенном значении добротности до тех пор, пока значение перерегулирования не достигнет исходного уровня типовой настройки (рис. 4, кривая 3). Найденная добротность и соответствующая полоса пропускания контура скорости будут максимальными при заданном перерегулировании исходной настройки, что позволит в свою очередь увеличить добротность и полосу пропускания внешнего контура положения с цифровым регулятором.

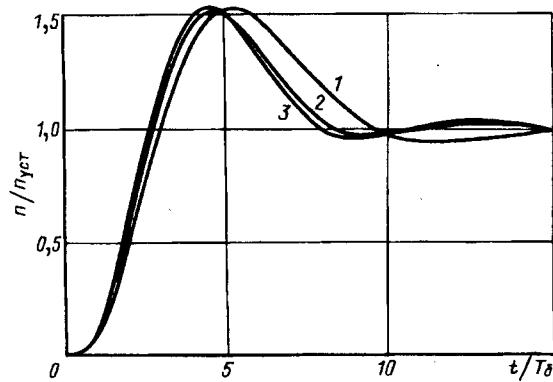


Рис. 4. Переходная характеристика скорости: 1 — симметричный оптимум; 2 — минимум перерегулирования; 3 — максимум добротности

В эксплуатации также находятся двукратно интегрирующие системы подчиненного регулирования скорости с цифровым интегрирующим и аналоговым пропорциональным каналами рассогласования скорости (рис. 5), сигналы с которых суммируются на аналоговом сумматоре  $PC$  [4]. На схеме, кроме ранее принятых условных обозначений,  $ДИ$  — датчик импульсов;  $ПКЧ$  — преобразователь код—частота;  $ЦИ$  — цифровой интегратор. Минимум перерегулирования скорости от скачка сигнала цифрового задатчика  $УВЗ$  при заданном исходной типовой настройкой значении добротности системы может быть найден при установке на блоке  $PC$  по входам аналоговых сигналов задания скорости  $n_3$  и тахогенератора

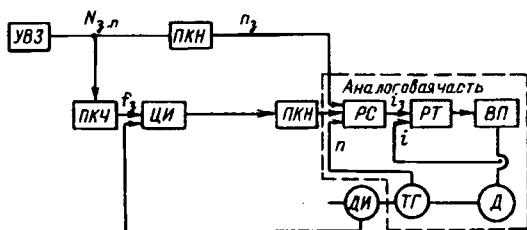


Рис. 5. Цифроаналоговая СИР скорости

и сдвоенного переменного резистора и одновременной вариацией его сопротивлений. Вариация коэффициента передачи аналогового пропорционального канала рассогласования скорости значительно упрощается при перебросе сигнала цифрового интегратора с блока  $PC$  на вход регулятора тока  $PT$ . Моделирование этих схемных решений показало процессы и результаты, аналогичные приведенным на рис. 2.

**Вывод.** Динамические и точностные показатели рассмотренных в статье систем могут быть улучшены вариацией одного органа настройки и наблюдением переходных характеристик без измерений абсолютных значений величин и дополнительных расчетов. Для уверенного поиска оптимума в процессе наладки достаточно устойчивости и колебательного характера начальной настройки системы независимо от того, каким образом они получены. Алгоритм поиска оптимальных значений параметров может быть легко реализован программно и запущен на выполнение во время технологической паузы на встроенной управляющей ЭВМ комплексного электропривода. Достоинства предлагаемой методики настройки возрастают при наладке сложных и вновь раз-

рабатываемых электроприводов, трудно поддающихся точному математическому описанию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шинкевич В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. — М.: Энергия, 1969.
  2. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорным электроприводом постоянного тока. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
  3. Богданова Н.В., Гуль А.И. Оптимизация двукратно интегрирующей системы по критерию наибольшей добродности по ускорению — Изв. вузов. Электромеханика, 1987. № 4.
  4. Слежановский О.В., Бирюков А.В., Хуторецкий В.М. Устройства унифицированной блочной системы регулирования дискретного типа (УБСР-Д). — М.: Энергия, 1975.

[06.06.94]

Авторы: Клепиков Владимир Борисович окончил электромашиностроительный факультет Харьковского политехнического института в 1961 г. В 1989 г. в Московском энергетическом институте защитил докторскую диссертацию «Динамика электромеханических систем с отрицательным вязким трением». Заведующий кафедрой «Автоматизированные электромеханические системы» Харьковского государственного политехнического университета (ХГПУ).

Гуль Альберт Игнатьевич окончил факультет электрификации Харьковского института механизации и электрификации сельского хозяйства в 1959 г. В 1990 г. во ВНИИэлектроприводе защитил кандидатскую диссертацию «Разработка двухканальных многосвязных электроприводов с многократно интегрирующими контурами управления». Начальник кафедрального вычислительного центра, старший научный сотрудник кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» ХГПУ.

Если Вы работаете в области энергетики или электротехники, позаботьтесь о том, чтобы Ваши предприятия, лаборатория, институт, кафедра не опоздали с подпиской на

## « Э Л Е К Т Р И Ч Е С Т В О »

- + старейший отечественный теоретический и научно-практический журнал, орган Российской Академии наук, Федерации энергетических и электротехнических обществ;
  - + выходит ежемесячно, предназначен для высококвалифицированных специалистов в области энергетики и электротехники;
  - + публикует теоретические и научно-практические работы отечественных и зарубежных ученых и инженеров, освещает работу российских и международных конференций, рецензирует учебники и монографии по тематике журнала, помещает материалы по истории электротехники, статьи о выдающихся отечественных ученых;
  - + переводится на английский язык, издается и распространяется в мире издательством «Elsevier Science»; русскоязычное издание поступает по все промышленно развитые страны мира.

Условия подписки указаны в Каталоге издательства «Известия», индекс 71106

# Вибрационный электромеханический преобразователь со спиральным вторичным элементом

ХАЙРУЛЛИН И.Х., ЯНГИРОВ И.Ф., ИСМАГИЛОВ Ф.Р.

Приведены результаты теоретического анализа электромеханического преобразователя со спиральным электропроводящим элементом; получены выражения для расчета выходных характеристик, которые подтверждены экспериментально.

**Ключевые слова:** электромеханический преобразователь, спиральный электропроводящий элемент, характеристики, теоретический анализ

Для прямого преобразования механической энергии колебательного движения в электрическую могут быть использованы электромеханические преобразователи, принцип действия которых основан на различных физических явлениях. В настоящее время широко применяются пьезоэлектрические, емкостные, индуктивные, индукционные преобразователи, способные работать в качестве электрического генератора. Они представляют интерес для машиностроения, вибрационной техники, приборостроения. Несмотря на большое число модификаций таких преобразователей в целях расширения их технических характеристик возникает необходимость разработки новых преобразователей, способных работать в режиме генератора.

Большой интерес представляет вибрационный электромеханический преобразователь со спиральным вторичным элементом [1]. Хотя такой преобразователь является маломощным, однако из-за отсутствия механических преобразовательных узлов он характеризуется большей надежностью и лучшими массогабаритными показателями. Обзор отечественной и зарубежной литературы показывает отсутствие теоретических исследований подобных электромеханических преобразователей — генераторов. Такие вибрационные электрические генераторы со спиральным элементом могут найти широкое применение в приборостроении как датчик виброускорений, бытовой технике как преобразователь энергии волн и т. д.

На рис. 1 приведена конструктивная схема электрического генератора со спиральным электропроводящим элементом (ЭГСЭ). При вибрациях спиральной пружины относительно магнитного поля в ней наводится соответствующая ЭДС движения.

При решении задачи используются следующие допущения: магнитное поле в зазоре одномерное; магнитная проницаемость материала магнитопровода равна бесконечности; сопротивление нагрузки стремится к бесконечности; механический гистерезис отсутствует; модуль уп-

*Results of theoretical analysis of an electromechanical converter with a spiral conducting element are presented. Expressions for calculating output characteristics are derived and confirmed experimentally.*

**Ключевые слова:** electromechanical converter, spiral conducting element, characteristics, theoretical analysis

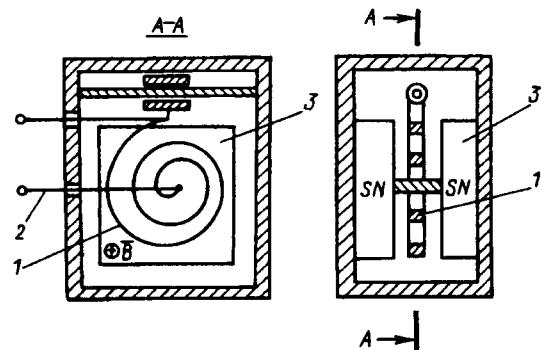


Рис. 1. Вибрационный электрический генератор со спиральным вторичным элементом: 1 — спиральная электропроводящая пружина; 2 — электрические выводы; 3 — магнитная система, создающая магнитный поток в зоне расположения спирали

ругости изоляции проводника равен нулю; механическое трение между витками отсутствует; механические напряжения в витках не превосходят допустимого предела упругости.

Эти допущения являются общепринятыми и при необходимости могут быть учтены соответствующими поправочными коэффициентами. Так, первые два допущения успешно применялись при исследовании специальных электрических машин [2], а остальные — при исследовании на статическую и динамическую устойчивость различных механических конструкций [3, 4]. В данном случае магнитная система преобразователя имеет относительно большие и малый воздушный зазор, а колебания спиральной пружины происходят с малой амплитудой, поэтому принятые допущения вполне приемлемы.

Для упрощения решения задачи применен «метод приведения» [3, 4]. В данном случае форма колебания спиральной пружины задана в виде последовательных круговых витков с сохранением геометрических размеров витка, шага и числа витков спирали. Форма определена таким образом (рис. 2), чтобы удовлетворить граничным условиям колебания спиральной пружины и чтобы в одной из точек спирали форма была равна единице — точка приведения. При этом возможно

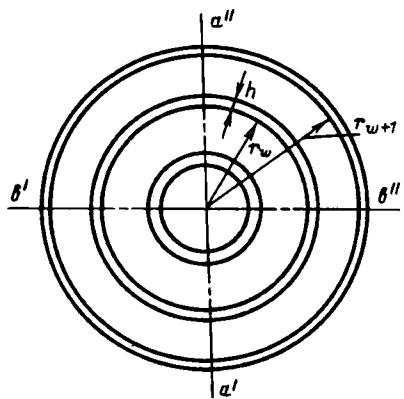


Рис. 2. Форма колебания спиральной пружины

рассмотрение колебания спиральной пружины в декартовой системе координат, так как система сводится к системе с одной степенью свободы. При этом, чем точнее будет задана форма колебания, тем точнее решение задачи.

На рис. 3 изображены силы, действующие на виток спирали в форме круговых колец.

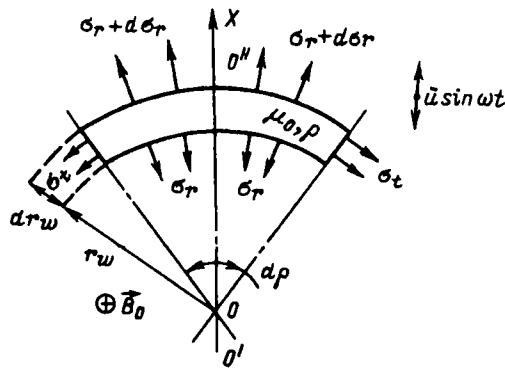


Рис. 3. Часть расчетной схемы спирали преобразователя

В результате преобразования уравнения свободного колебания спиральной пружины с учетом действующих сил получено соотношение для радиального перемещения  $w$ -го витка спирали:

$$\rho \frac{1-\mu^2}{E} \frac{\partial^2 u_w}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u_w}{\partial r_w^2} + \frac{1}{r_w} \frac{\partial u_w}{\partial r_w} - \frac{1}{r_w^2} u_w, \quad (1)$$

где  $E$  — модуль упругости Юнга;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\rho$  — плотность материала спирали;  $u_w$  — значение радиального перемещения;  $r_w$  — радиус  $w$ -го витка.

Для решения исходного уравнения (1) используются граничные условия: в точке крепления  $r_w=r_0$  перемещение витка отсутствует,  $u_w(r_0)=0$  и в точке приведения спирали коэффициент формы равняется единице [3, 4],  $u_w(R_0)=1$ , где  $R_0$  — внешний радиус спирали.

Уравнение, описывающее вынужденное движение точки приведения спирали, имеет вид

$$\ddot{x} + 2\xi\dot{x} + \omega_0^2 x = A_{\text{вх}} u_w(1) \sin \omega t, \quad (2)$$

где  $\xi$  — коэффициент трения;  $\omega_0$  — собственная частота;  $x$  — ось колебания точки приведения;  $u_w(1)$  — форма колебания спирали, которая определяется решением уравнения (1) методом Фурье [5]:

$$u_w(t) = R_w(r_w) \theta_w(t) = R_w(r_w) \theta_{1m} e^{-j(\omega_0 t - \varphi_0)}. \quad (3)$$

Здесь  $R_w(r_w)$  — функция координат;  $\theta_w(t)$  — функция времени.

Подстановка (3) в (1) дает уравнение вида

$$\frac{d^2 R_w}{dr_w^2} + \frac{1}{r_w} \frac{dR_w}{dr_w} + \left[ (\omega_0 \sqrt{\rho k})^2 - \frac{1}{r_w^2} \right] R_w = 0. \quad (4)$$

Решениями этого уравнения являются функции Бесселя первого рода  $J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_w)$ , второго рода  $N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_w)$  и общее решение уравнения (4):

$$R_w = C_{1w} J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_w) + C_{2w} N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_w). \quad (5)$$

Так как витки спиральной пружины жестко связаны между собой, то предполагается, что  $C_1 = C_{11} = C_{12} = \dots = C_{1w}$  и  $C_2 = C_{21} = C_{22} = \dots = C_{2w}$ , тогда общее решение уравнения (1) имеет вид

$$u_w = [C_1 J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_w) + C_2 N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_w)] \times e^{-j(\omega_0 t - \varphi_0)}, \quad (6)$$

где  $k = (1 - \mu^2)/E$ .

Используя принятые граничные условия, система уравнений для определения постоянных интегрирования записывается в виде

$$\left. \begin{aligned} C_1 J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_w) + C_2 N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_w) &= 0; \\ C_1 J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} R_0) + C_2 N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} R_0) &= 1, \end{aligned} \right\}$$

откуда постоянные интегрирования:

$$C_1 = \frac{N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_0)}{J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} R_0) N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_0) - J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_0) N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} R_0)}; \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_0)}{J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} R_0) N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_0) - J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_0) N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} R_0)}. \quad (8)$$

Радиальные перемещения  $w$ -го витка спирали (безразмерная величина) после подстановки постоянных интегрирования в (6) определяется как

$$u_w = \frac{J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_w) + A N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_w)}{J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} R_0) + A N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} R_0)}, \quad (9)$$

где

$$A = -J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_0)/N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_0).$$

Тогда форма колебания спиральной пружины

$$u_w(1) = \sum_{w=1}^N \frac{J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_w) + A N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} r_w)}{J_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} R_0) + A N_1(\omega_0 \sqrt{\rho k} R_0)}.$$

Уравнение (2) имеет решение:

$$x(t) = \frac{1}{\omega_0^2} \frac{A_{\text{вх}}}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \sin(\omega t - \alpha), \quad (10)$$

где  $q$  — относительная частота;  $D$  — относительная степень успокоения.

Скорость радиального перемещения  $w$ -го витка спиральной пружины в магнитном поле

$$v_w(t) = \frac{1}{2\pi\omega_0} A_{\text{вх}} u_w(1) \frac{q}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \cos(\omega t - \alpha). \quad (11)$$

Наводимая в каждом витке спиральной пружины ЭДС определяется как ЭДС движения проводника в постоянном магнитном поле [6]:

$$e_w = B_0 2\pi r_w v_w(t). \quad (12)$$

Общее выражение выходной характеристики вибрационного электрического генератора со спиральным вторичным элементом имеет вид

$$E = \frac{B_0 A_{\text{вх}}}{\omega_0} \frac{q}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \sum_{w=1}^N r_w u_w(1), \quad (13)$$

или в отн. ед.

$$E^* = \frac{q}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \sum_{w=1}^N \gamma_w \frac{J_1(l_0 \gamma_w) + A N_1(l_0 \gamma_w)}{J_1(l_0 R_0/R_1) + A N_1(l_0 R_0/R_1)}, \quad (14)$$

где за базовую принята величина  $e_{\text{баз}} = B_0 R_1 A_{\text{вх}} / \omega_0$ ;  $\gamma_w = r_w / R_1$  — относительный радиус;  $l_0 = \omega_0 \sqrt{\rho k} R_1$  — витковый коэффициент;  $R_1$  — радиус первого витка спирали.

Представляет интерес расчет выражения (14) для некоторых частных случаев.

1. Спиральный электрический генератор имеет малую частоту собственных колебаний и аргумент функции Бесселя существенно меньше единицы ( $l_0 \gamma_w \ll 1$ ). Используя соотношения для функции Бесселя малых аргументов (7), после несложных преобразований для этого случая имеем

$$e_m = \frac{B_0}{\omega_0 R_0} A_{\text{вх}} \frac{q}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \sum_{w=1}^N r_w^2. \quad (15)$$

2. Спиральный электрогенератор имеет большую частоту собственных колебаний и аргумент функции Бесселя существенно больше единицы ( $l_0 \gamma_w \gg 1$ ). Используя формулы для функции Бесселя больших аргументов, после преобразований имеем

$$e_m = \frac{B_0}{\omega_0} \sqrt{R_1 R_0} A_{\text{вх}} \frac{q}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \times \\ \times \sum_{w=1}^N \frac{\sqrt{\gamma_w} [\sin(l_0 \gamma_w - \pi/4) - A \cos(l_0 \gamma_w - \pi/4)]}{\sin(l_0 R_0/R_1 - \pi/4) - A \cos(l_0 R_0/R_1 - \pi/4)}, \quad (16)$$

и в случае двухвитковой модели генератора

$$e_m = \frac{B_0}{\omega_0} A_{\text{вх}} \frac{q}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} R_0, \quad (17)$$

что совпадает с выражениями, полученными при исследовании классических магнитоэлектрических преобразователей [8].

Результаты вычислений относительных выходных характеристик, проведенные по (14), для некоторых вариантов исполнений вибрационного электрического генератора из спиральной пружины из латуни с параметрами:  $w=3$ ;  $r_0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $R_1 = 6,55 \cdot 10^{-3}$  м;  $R_2 = 11,57 \times 10^{-3}$  м;  $R_3 = 15,84 \cdot 10^{-3}$  м;  $h = 0,3 \cdot 10^{-3}$  м;  $b = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м и из спирали из латуни с геометрическими размерами  $w=3$ ;  $r_0 = 3,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $R_1 = 7,38 \cdot 10^{-3}$  м;  $R_2 = 10,73 \cdot 10^{-3}$  м;  $R_3 = 13,09 \cdot 10^{-3}$  м;  $h = 0,3 \cdot 10^{-3}$  м;  $b = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м приведены на рис. 4 ( $R_1 \dots R_3$  — средние радиусы спиральной пружины;  $h$  и  $b$  — толщина и ширина спиральной пружины соответственно); там же показаны экспериментальные характеристики разработанных вибрационных электрогенераторов с теми же геометрическими параметрами.

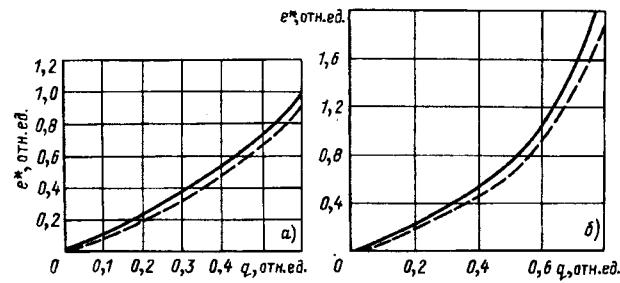


Рис.4. Зависимость относительной выходной характеристики опытной модели вибрационного электрического генератора со спиральной пружиной из латуни (а) и со спиралью из латуни (б): — расчет по (14); — экспериментальные данные

Экспериментальная проверка полученных соотношений на опытных образцах позволяет сделать вывод, что рассчитанные по (14) значения выходных характеристик совпадают с опытными (не более 12%) в пределах точности эксперимента. При этом абсолютные значения измеренных ЭДС равны 0÷4,4 мВ в зависимости от индукции магнитного поля и частоты колебания пружины. Относительная погрешность измерений выходного сигнала не превышала 5%.

Полученные соотношения позволяют анализировать различные конструкции вибрационных преобразователей со спиральным элементом и могут быть использованы при расчетах и проектировании таких преобразователей работающими как в линейной, так и в нелинейной части характеристик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 2003982 (Российская Федерация). Датчик скорости изменения ускорения / И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмагилов, И.Ф. Янгиров, Т.И. Хайруллин. — Опубл. в БИ, 1993, № 43, 44.
2. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкокометаллическим рабочим телом. — Л.: Энергия, 1970.
3. Прочность реветных конструкций / В.И. Моссаковский, А.Г. Макаренков, П.И. Никитин и др. Под ред. В.И. Моссаковского — М.: Высшая школа, 1990.
4. Тимошенко С.П., Янг Д.К., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Под ред. Э.И. Криголюка — М.: Машиностроение, 1985.
5. Кори Г., Кори Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Под ред. И.Г. Арамановича. — М.: Наука, 1984.
6. Вольдек А.И. Электрические машины. — М.; Л.: Энергия, 1974.
7. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовича, И. Стигана. — М.: Наука, 1979.
8. Вибрация в технике. Справочник. Т. 3 / Под ред. Ф.М. Диментберга и К.С. Колесникова, 1980.

[05.06.95]

Авторы: Хайруллин Ирек Ханифович окончил электромеханический факультет Ивановского энергетического института (ИЭИ) в 1963 г. В

1979 г. защитил докторскую диссертацию на тему: «Исследование электромагнитных демпфирующих элементов систем управления» в Уфимском авиационном институте (УАИ). Профессор кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ).

Янгиров Ильгиз Флюсович окончил факультет авиационного приборостроения УАИ в 1988 г. В 1993 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Электромеханический вибрационный преобразователь со спиральным вторичным элементом для систем управления». Ассистент кафедры «Электромеханика» УГАТУ.

Исмагилов Флюр Рашидович окончил электромеханический факультет УАИ в 1973 г. В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование электродинамических демпферов с коническим ротором для управляемых амортизационных систем». Доцент кафедры «Электромеханика» УГАТУ.

## Топологические формулы для преобразования полного электрического многоугольника в эквивалентную звезду

ФИЛАРЕТОВ В.В.

Предложены новые формулы для определения  $n$  параметров  $n$ -лучевой звезды по  $n$  параметрам полного электрического  $n$ -угольника. Эти формулы базируются на анализе топологии подсхемы, состоящей из независимых проводимостей  $n$ -угольника. Данные формулы, в отличие от формул А.П. Новикова (1946 г.), не содержат операций извлечения квадратного корня. Рассмотрены доказательства и примеры использования предложенных формул.

**Ключевые слова:** преобразование многоугольника в звезду, контур, контур с висячей ветвью, топологический определитель контура

Преобразование «звезда—треугольник» и обратное ему преобразование «треугольник—звезда» широко известны среди электротехников. Однако не все знают, что обобщение прямого преобразования представляет собой преобразование многолучевой звезды в полный электрический многоугольник и было предложено Розеном [1]:

$$y_{ij} = y_i y_j / y_{\Sigma}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где  $y_{ij}$  — проводимость полного  $n$ -угольника,

New formulae are derived for determining  $n$ -parameters of a  $n$ -ray star by the use of  $n$ -parameters of a complete electrical  $n$ -polygon. These formulae are based on an analysis of the topology of a subnetwork consisted of independent admittances of a  $n$ -polygon. The formulae deduced unlike the ones proposed by A. Novikov in 1946 do not require operation on the square root extraction. Examples of the application of the formulae presented in this are given.

**Key words:** transfiguration from polygon into star, loop, loop with branch, topological determinant of loop

включенная между узлами  $i$  и  $j$ ;  $y_1, y_2, \dots, y_n$  — проводимости  $n$ -лучевой звезды, которым присвоены номера в соответствии с номерами узлов  $n$ -угольника;

$$y_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n y_k.$$

Одним из первых условий возможности обратного преобразования Розена или преобразования полного  $n$ -угольника в эквивалентную  $n$ -

лучевую звезду рассмотрел А.А. Горев [2]. Им было показано, что  $n(n-1)/2$  проводимостей  $n$ -угольника должны быть попарными произведениями  $n$  чисел  $y_1/\sqrt{y_\Sigma}$ ,  $y_2/\sqrt{y_\Sigma}$ , ...,  $y_k/\sqrt{y_\Sigma}$ , ...,  $y_n/\sqrt{y_\Sigma}$ . Параметры  $y_k/\sqrt{y_\Sigma}$  много лет спустя были названы постоянными узлов многоугольника [3]. Таким образом,  $n(n-3)/2$  проводимостей  $n$ -угольника оказываются зависимыми, а любая его проводимость находится как произведение постоянных соответствующих узлов.

Общее положение о зависимости проводимостей контура с четным количеством ветвей сформулировал А.П. Новиков [4, с. 61]:

«... Если в произвольном контуре полного многоугольника с четным числом сторон... эти стороны перенумеровать по порядку, то произведение проводимостей четных сторон равно произведению проводимостей нечетных сторон...». В этой же работе была предложена формула для расчета постоянной узла  $N_i$  через проводимости двух ветвей, инцидентных рассматриваемому узлу  $i$ , и проводимость ветви  $y_{kj}$ , дополняющей указанные ветви до треугольника ветвей:

$$N_i = \sqrt{\frac{y_{ij}y_{ik}}{y_{kj}}}. \quad (2)$$

Проводимости эквивалентной звезды находятся по формулам Новикова как

$$y_i = N_i N_\Sigma, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

$$\text{где } N_\Sigma = \sum_{k=1}^n N_k.$$

Практическую ценность формул (3) снижает наличие в них  $n$  операций извлечения квадратного корня и такого же числа операций деления. В [5] предложена модификация формул Новикова, учитывающая уже упомянутую зависимость между постоянными двух узлов:

$$N_i N_j = y_{ij}. \quad (4)$$

Полученные формулы для расчета проводимостей эквивалентной звезды лишены иррациональностей и обладают существенно меньшей вычислительной трудоемкостью.

Недостатком модифицированных формул (без применения дополнительных соотношений [5]) является использование всех  $n(n-1)/2$  проводимостей многоугольника. В то же время в формулах (3) используется в худшем случае только  $2n$  проводимостей. Если же независимые проводимости многоугольника (назовем их для удобства его ядром) образуют некоторое количество некасающихся контуров-треугольников, то нахождение  $n$  проводимостей эквивалентной звезды требует всего  $n$  значений проводимостей многоугольника. Отсутствие избыточности вычислений имеет

место и в более общем случае, когда ядро многоугольника образуют некасающиеся контуры с произвольным нечетным количеством ветвей. Переход от ядра к зависимым проводимостям многоугольника в этом случае требует использования, наряду с формулой (4), приведенного выше положения А.П. Новикова.

Следует подчеркнуть, что формулы для обратного преобразования Розена, лишенные избыточности, позволяют избежать предварительного трудоемкого исследования многоугольника с целью установления возможности его преобразования в звезду на основе тех или иных условий [2–5]. Использование безызбыточных формул в сочетании с методом расщепления ветвей [3] расширяет область применения преобразования «многоугольник–звезда» в задачах моделирования, синтеза и оптимизации электрических цепей. Цель данной статьи — получение формул для преобразования полного многоугольника в эквивалентную звезду, не только лишенных избыточности, но и не требующих операций извлечения квадратного корня, что делает эти формулы особенно удобными в случае комплексных проводимостей ветвей.

Известные выводы формул Новикова и их модификаций [5–6] не предусматривают прямого решения системы уравнений (1) относительно  $y_1, y_2, \dots, y_n$  методом подстановки-исключения, оставив в ней  $n$  уравнений, левые части которых будут соответствовать ядру многоугольника. Однако опыт аналитического решения систем нелинейных алгебраических уравнений топологических функций электрических цепей [7] показывает, что крайне громоздкие выкладки могут привести в итоге к весьма лаконичному результату. Возможность получения такого результата подкрепляется также регулярностью структуры исследуемого полного многоугольника. В этом состоит идея вывода формул для обратного преобразования Розена, реализуемая в данной статье.

Во избежание трудоемких манипуляций с индексами известным проводимостям многоугольника — проводимостям ядра присвоены обозначения  $a_1, a_2, \dots, a_n$ . В случае нечетного  $n$  в качестве ядра удобно выбрать контур  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , при прохождении которого по часовой стрелке последовательно встречаются 1, 2, ...,  $n$  лучи эквивалентной звезды  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , как показано на рис. 1,а. Для четного  $n$  целесообразно использовать контур из  $n-1$  ветвей и висячую ветвь  $a_n$ , что иллюстрирует рис. 1,б.

Первоначально рассмотрим простейший случай  $n=3$ , когда система уравнений (1) является определенной. Этот случай представлен на рис. 2,а, где проводимости звезды обозначены штриховыми линиями. С учетом введенных обозначений

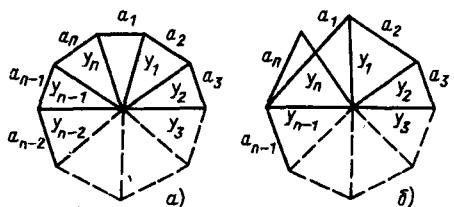


Рис. 1

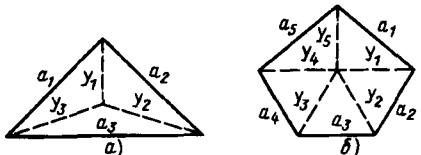


Рис. 2

система уравнений (1) преобразуется к виду

$$\left. \begin{array}{l} a_1 = y_1 y_3 / y_{\Sigma} ; \\ a_2 = y_1 y_2 / y_{\Sigma} ; \\ a_3 = y_2 y_3 / y_{\Sigma} , \end{array} \right\} \quad (5)$$

где  $y_{\Sigma} = y_1 + y_2 + y_3$ .

После выражения  $y_1$  из первого уравнения и подстановки его во второе и третье уравнения имеем

$$a_2 y_3 = a_1 y_2 ,$$

$$a_3 (y_2 + y_3) = y_2 (y_3 - a_1) .$$

Отсюда получаем

$$y_3 = D_3 / a_2 , \quad (6)$$

где  $D_3 = a_1 (a_2 + a_3) + a_2 a_3$ .

Из формулы (6) с учетом симметрии системы уравнений (5) имеем

$$y_1 = D_3 / a_3 , \quad (7)$$

$$y_2 = D_3 / a_1 . \quad (8)$$

Формулы (6)–(8) известны из любого курса по электротехнике.

Продолжим рассмотрение многоугольников с нечетным  $n$  и примем  $n=5$ . В этом случае необходимо сократить переопределенную систему уравнений (1) до  $n$  уравнений для проводимостей ядра

$$\left. \begin{array}{l} a_1 = y_1 y_5 / y_{\Sigma} ; \\ a_2 = y_1 y_2 / y_{\Sigma} ; \\ a_3 = y_2 y_3 / y_{\Sigma} ; \\ a_4 = y_3 y_4 / y_{\Sigma} ; \\ a_5 = y_4 y_5 / y_{\Sigma} , \end{array} \right\} \quad (9)$$

где  $y_{\Sigma} = \sum_{k=1}^5 y_k$

Данную задачу и обозначения поясняет рис. 2, б, на котором указаны только проводимости пятиугольника, входящие в ядро.

Решая систему (9) методом подстановки и опуская трудоемкие выкладки, получаем

$$\left. \begin{array}{l} y_1 = D_5 / (a_3 a_5) ; \\ y_2 = D_5 / (a_1 a_4) ; \\ y_3 = D_5 / (a_2 a_5) ; \\ y_4 = D_5 / (a_1 a_3) ; \\ y_5 = D_5 / (a_2 a_4) , \end{array} \right\} \quad (10)$$

где  $D_5 = a_2 [a_4 (a_1 + a_5) + a_3 a_5] + a_1 a_3 (a_4 + a_5)$ .

Начиная с  $n=7$ , подобные решения задачи преобразования многоугольника в эквивалентную звезду становятся излишне трудоемкими и вряд ли возможны без привлечения систем аналитических вычислений [8]. Однако топологический анализ слагаемых числителей и знаменателей в формулах (6)–(8) и (10) позволяет выявить некоторые общие закономерности для случая большего нечетного  $n$ . Это потребует введения топологических понятий определителя контура и определителя узла контура:  $n$ -контуром будем называть контур, образованный  $n$  независимыми проводимостями ( $n$  — нечетное); определитель  $n$ -контура выражается суммой  $n$  слагаемых. Каждое слагаемое представляет собой  $(n+1)/2$  сомножителей.

Первые два сомножителя слагаемого являются значениями проводимостей одной из пар смежных ветвей контура. Таких пар в  $n$ -контуре может быть  $n$  (по количеству слагаемых в определителе этого контура). Оставшиеся  $(n-3)/2$  сомножителей являются значениями проводимостей тех ветвей контура, которые несмежны друг другу и ветвям, учитываемым в первых двух сомножителях данного слагаемого. Топологическое представление слагаемых определителя контура при  $n=7$  дано на рис. 3, а.

Для получения определителя  $i$ -го узла  $n$ -контура необходимо образовать новый  $(n-2)$ -контур путем стягивания ветвей  $a_i$  и  $a_{s_i}$ . Здесь  $s_i = i+1$ ,  $i = 1, 2, \dots, n-1$ ;  $s_n = 1$ . Определитель узла всегда содержит только одно слагаемое, состоящее из  $(n-1)/2$  сомножителей. Первые два сомножителя являются значениями проводимостей ветвей, инцидентных объединенному (в результате стягивания) узлу. Оставшиеся  $(n-5)/2$  сомножителей являются значениями проводимостей тех ветвей  $(n-2)$ -контура, которые несмежны друг с другом и ветвями, учитываемыми в первых двух сомножителях.

При  $n=3$  данное правило нахождения определителя  $i$ -го узла  $n$ -контура вырождается и значение этого определителя следует принять равным проводимости ветви, превратившейся в петлю в результате стягивания ветвей  $a_i$  и  $a_{s_i}$  [см. формулы

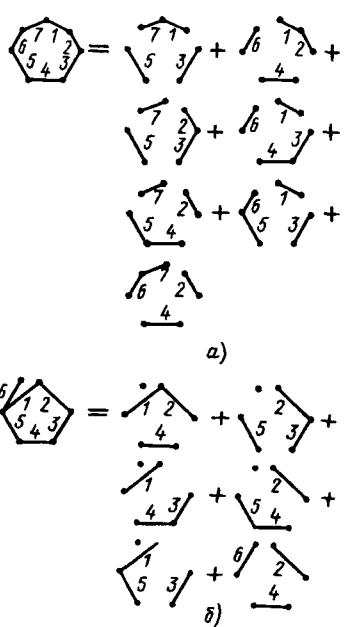


Рис. 3

(6)–(8)].

Используя понятия определителей контура и узла контура, можно записать формулы для нахождения проводимостей  $n$ -лучевой звезды при нечетном  $n$  в виде

$$y_i^n = D_n / a_n^i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

где  $D_n$  — определитель  $n$ -контура;  $a_n^i$  — определитель  $i$ -го узла  $n$ -контура.

В соответствии с топологической формулой (11) получаются формулы преобразования многоугольника в звезду (верхний индекс при символе  $y$  опущен) для  $n=7$ :

$$\left. \begin{array}{l} y_1 = D_7 / (a_3 a_5 a_7); \quad y_2 = D_7 / (a_1 a_4 a_6); \\ y_3 = D_7 / (a_2 a_5 a_7); \quad y_4 = D_7 / (a_1 a_3 a_6); \\ y_5 = D_7 / (a_2 a_4 a_7); \quad y_6 = D_7 / (a_1 a_3 a_5); \\ y_7 = D_7 / (a_2 a_4 a_6), \end{array} \right\} \quad (12)$$

где  $D_7 = a_1 [a_4 a_6 (a_2 + a_3) + a_3 a_5 (a_6 + a_7)] + a_2 a_7 \times [a_5 (a_3 + a_4) + a_4 a_6]$ , что соответствует топологическому представлению слагаемых на рис. 3, а.

Аналогично, для случая  $n=9$  получаем формулы

$$\left. \begin{array}{l} y_1 = D_9 / (a_3 a_5 a_7 a_9); \quad y_2 = D_9 / (a_1 a_4 a_6 a_8); \\ y_3 = D_9 / (a_2 a_5 a_7 a_9); \quad y_4 = D_9 / (a_1 a_3 a_6 a_8); \\ y_5 = D_9 / (a_2 a_4 a_7 a_9); \quad y_6 = D_9 / (a_1 a_3 a_5 a_8); \\ y_7 = D_9 / (a_2 a_4 a_6 a_9); \quad y_8 = D_9 / (a_1 a_3 a_5 a_7); \\ y_9 = D_9 / (a_2 a_4 a_6 a_8), \end{array} \right\} \quad (13)$$

где  $D_9 = a_1 \{a_3 [a_6 a_8 (a_4 + a_5) + a_5 a_7 (a_8 + a_9)] + a_2 a_4 a_6 a_8\} + a_2 a_9 \{a_4 [a_7 (a_5 + a_6) + a_6 a_8] + a_3 a_5 a_7\}$ .

В качестве примера рассчитаем параметры эк-

ивалентной девятилучевой звезды. Пусть независимые проводимости, образующие контур при  $n=9$  в полном девятиугольнике, имеют следующие значения (в сименсах): 1,12; 0,56; 0,72; 0,9; 1,1; 1,32; 1,56; 1,82; 2,24. По формулам (13) вычисляем  $D_9 = 19,3729536 \text{ См}^5$  и искомые значения проводимостей звезды (в сименсах): 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 16. Данные выше числовые последовательности упорядочены в соответствии с номерами индексов при символах  $a$  и  $y$ .

Теперь получим топологические формулы для преобразования полного многоугольника в эквивалентную звезду при четном  $n$ . В случае  $n=4$  имеем систему уравнений

$$\left. \begin{array}{l} a_1 = y_1 y_3 / y_\Sigma; \\ a_2 = y_1 y_2 / y_\Sigma; \\ a_3 = y_2 y_3 / y_\Sigma; \\ a_4 = y_3 y_4 / y_\Sigma, \end{array} \right\} \quad (14)$$

где  $y_\Sigma = \sum_{k=1}^4 y_k$ , которая соответствует графу, изображеному на рис. 4.

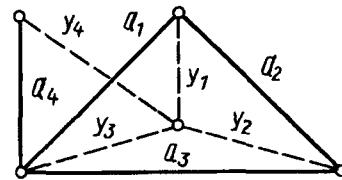


Рис. 4

В результате решения системы уравнений (14), которое опускаем, получаются следующие формулы для нахождения проводимостей эквивалентной четырехлучевой звезды:

$$\left. \begin{array}{l} y_1 = \Delta_4 / a_3; \quad y_2 = \Delta_4 / a_1; \\ y_3 = \Delta_4 / a_2; \quad y_4 = \Delta_4 / (a_1 a_3 / a_4), \end{array} \right\} \quad (15)$$

где  $\Delta_4 = a_1 (a_2 + a_3) + a_2 (a_3 + a_4)$ .

Сравнивая формулы (15) с формулами (6)–(8), (10) и (11), замечаем, что знаменатели проводимостей лучей звезды, за исключением проводимости луча, инцидентного висячей ветви  $a_4$  контура, находятся одинаковым образом:

$$d_4^i = d_3^i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (16)$$

Знаменатель проводимости луча, инцидентного висячей ветви, равен коэффициенту  $1/a_4$ , умноженному на определитель четвертого узла контура с увеличенным на единицу числом ветвей, т.е.

$$\Delta_4^4 = d_5^4 / a_4. \quad (17)$$

Числитель  $\Delta_4$  отличается от числителя  $D_3$  на-

личием дополнительного слагаемого  $a_2 a_4$ , значение которого равно с коэффициентом  $a_4$  определителю третьего узла контура, образованного в результате стягивания висячей ветви, т. е.

$$\Delta_4 = D_3 + a_4 d_3^3. \quad (18)$$

Заметим, что в данном случае контур вырождается в петлю и  $d_3^3 = a_2$ .

Обобщая формулы (15)–(18), получаем формулу для нахождения проводимостей  $n$ -лучевой звезды при четном  $n$  в виде

$$y_i^n = \begin{cases} \Delta_n / d_{i-1}^i, & i = 1, 2, \dots, n-1; \\ \Delta_n / (d_{n+1}^i / a_n), & i = n, \end{cases} \quad (19)$$

где  $\Delta_n = D_{n-1} + a_n d_{n-1}^{n-1}$ .

Отсюда следует, что в случае  $n=6$  проводимости эквивалентной звезды рассчитываются по формулам

$$\left. \begin{array}{l} y_1 = \Delta_6 / (a_3 a_5); \quad y_2 = \Delta_6 / (a_1 a_4); \\ y_3 = \Delta_6 / (a_2 a_5); \quad y_4 = \Delta_6 / (a_1 a_3); \\ y_5 = \Delta_6 / (a_2 a_4); \quad y_6 = \Delta_6 / (a_1 a_3 a_5 / a_6), \end{array} \right\} \quad (20)$$

где  $\Delta_6 = D_5 + a_2 a_4 a_6$ .

Топологическое представление слагаемых определителя контура при  $n=5$  с висячей ветвью показано на рис. 3,б.

Ниже приводится частный случай топологической формулы (19) при  $n=8$ :

$$\left. \begin{array}{l} y_1 = \Delta_8 / (a_3 a_5 a_7); \quad y_2 = \Delta_8 / (a_1 a_4 a_6); \\ y_3 = \Delta_8 / (a_2 a_5 a_7); \quad y_4 = \Delta_8 / (a_1 a_3 a_6); \\ y_5 = \Delta_8 / (a_2 a_4 a_7); \quad y_6 = \Delta_8 / (a_1 a_3 a_5); \\ y_7 = \Delta_8 / (a_2 a_4 a_6); \quad y_8 = \Delta_8 / (a_1 a_3 a_5 a_7 / a_8), \end{array} \right\} \quad (21)$$

где  $\Delta_8 = D_7 + a_2 a_4 a_6 a_8$ .

В формулах (20) и (21) верхние индексы при символе  $y$  опущены для краткости записи. Слагаемые  $D_5$  и  $D_7$  равны одноименным определителям, содержащимся в формулах (10) и (12).

В качестве примера рассчитаем параметры эквивалентной восьмилучевой звезды. Пусть независимые проводимости ядра, образующие контур при  $n=7$  с висячей ветвью  $a_8$  в полном восьмиугольнике, имеют следующие значения (в сименсах): 1,35; 0,9; 1,1; 1,32; 1,56; 1,82; 2,1; 2,4. По формулам (21) вычисляем  $\Delta_8 = 32,4324 \text{ См}^4$  и искомые значения проводимостей звезды (в сименсах): 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16.

Аналогично выражениям (12), (13), (20) и (21) нетрудно записать формулы преобразования полного  $n$ -угольника в эквивалентную  $n$ -лучевую звезду для большого числа  $n$ , поскольку топологические правила образования числителя и знаменателя в формулах (11) и (19) весьма просты и наглядны. Замечательно, что в знаменателе всегда одно слагаемое, а количество слагаемых в

числителе составляет  $n$ . Кроме того, использование предложенных формул для преобразования полных многоугольников с комплексными параметрами, в отличие от известных формул, не вызывает каких-либо затруднений [6].

Топологические формулы (11) и (19) легко запрограммировать в общем виде, оперируя вектором ссылок  $S$ . Нами была выполнена численная проверка этих формул с помощью соотношений (1) на компьютере до  $n=100$ . Теперь, когда топологическое решение задачи преобразования полного многоугольника в звезду известно, можно выполнить аналитическое доказательство формул (11) и (19) на основе формул Новикова.

Для этого выразим постоянные узлов через проводимости тех же ядер (см. рис. 1,а и б), которые уже были использованы при получении формул (11) и (19). Применяя формулу (2) в случае нечетного  $n$ , имеем

$$N_i = \sqrt{a_i a_{s_i} / x_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (22)$$

где  $x_i$  — проводимость  $n$ -угольника, включенная между узлами с номерами  $i-1$  и  $s_i$  ( $i < 1$ ) или между узлами с номерами  $n$  и 2 ( $i=1$ ).

Проводимость  $x_i$  является зависимой, и этим объясняется избыточность формулы (3) по сравнению с формулой (11). Избавиться от избыточности в данном случае можно путем нахождения  $x_i$  как проводимости, входящей в четный  $(n-1)$ -контур, который образован всеми независимыми проводимостями  $n$ -угольника, кроме  $a_i$  и  $a_{s_i}$ . Отсюда получаем

$$x_i = d_n^i / [L_n / (a_i a_{s_i} d_n^i)],$$

где  $L_n = \prod_{k=1}^n a_k$ , что после подстановки в формулу (22) дает

$$N_i = \sqrt{L_n / d_n^i}. \quad (23)$$

Учет выражения (23) в формуле (3) приводит к топологической формуле

$$y_i^n = \frac{L_n}{d_n^i} \sum_{k=1}^n (1/d_k^i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (24)$$

которая эквивалентна формуле (11), в чем нетрудно убедиться на примерах формул с  $n=5, 7, 9$  [см. формулы (10), (12), (13)].

Аналогично поступаем в случае четного  $n$ :

$$\left. \begin{array}{l} N_i = \sqrt{a_i a_{s_i} / x_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1; \\ N_n = \sqrt{a_n x_n / a_1} \end{array} \right\} \quad (25)$$

Здесь  $s_i = i+1$ ,  $i = 1, 2, \dots, n-2$ ;  $s_{n-1} = 1$ .

Преобразование формулы (3) в формулу (19) требует исключения избыточных параметров. Для нахождения  $N_i$ ,  $i \neq n$  без избыточности необходимо выразить  $x_i$  через проводимости четного  $(n-2)$ -контура, который образован всеми независимыми проводимостями  $n$ -угольника, кроме  $a_i$ ,  $a_{s_i}$  и  $a_n$ . Отсюда имеем

$$x_i = d_{n-1}^i / [L_{n-1} / (a_i a_{s_i} d_{n-1}^i)],$$

где  $L_{n-1} = \prod_{k=1}^{n-1} a_k$ , что после подстановки в первую подформулу (25) дает

$$N_i = \sqrt{L_{n-1}} / d_{n-1}^i. \quad (26)$$

При нахождении  $N_n$  используем четный  $n$ -контур, который образует проводимость  $x_n$  со всеми независимыми проводимостями  $n$ -угольника, кроме  $a_1$ . Отсюда получаем

$$x_n = [L_n^a / (d_{n+1}^n / a_1)] / (d_{n+1}^n / a_1),$$

где  $L_n^a = \prod_{k=2}^n a_k$ , что после подстановки во вторую подформулу (25) дает

$$N_n = a_n \sqrt{L_{n-1}} / d_{n+1}^n. \quad (27)$$

Учет выражений (26) и (27) в формуле (3) приводит к топологической формуле

$$\left. \begin{array}{l} y_i^n = L_{n-1} Q / d_{n-1}^i, \quad i=1, 2, \dots, n-1; \\ y_n^n = L_n Q / d_{n+1}^n, \end{array} \right\} \quad (28)$$

где

$$Q = a_n / d_{n+1}^n + \sum_{k=1}^{n-1} (1 / d_{n-1}^k).$$

Формулы (19) и (28), подобно формулам (11) и (24), эквивалентны, в чем можно убедиться на реализациях для  $n=4, 6, 8$  [см. формулы

(15), (20), (21)].

Выкладки (22)–(28) позволили осуществить переход от формул Новикова к формулам (11) и (19), что служит строгим доказательством последних. Вспомогательные формулы (24) и (28) также содержат решение задачи обратного преобразования Розена, лишенное избыточности и иррациональностей, а значит, могут использоваться наряду с формулами (11) и (19).

**Вывод.** Предложенные топологические формулы (11) и (19), (24) и (28) обеспечивают прямой и лишенный иррациональностей путь от  $n$  проводимостей полного  $n$ -угольника к  $n$  проводимостями эквивалентной  $n$ -лучевой звезды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rozen A. A new network theorem. — Journal of the Institution of Electrical Engineers (London), 1924, vol. 62.
2. Горев А.А. Приведение сложных сетей к простейшим эквивалентным схемам: Сборник трудов Ленинградского индустриального ин-та. — Л.: КУБУЧ, 1934. № 3(5).
3. Максимович Н.Г. Линейные электрические цепи и их преобразования. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.
4. Новиков А.П. Преобразование электрического многоугольника в эквивалентную звезду. — Электричество, 1946, № 10.
5. Горев А.А., Костенко М.В. Приведение сложных сетей к простейшим эквивалентным схемам. — Электричество, 1948, № 3.
6. Казаков О.И. О возможности преобразования полного  $n$ -угольника резисторов в  $n$ -лучевую звезду. — Электричество, 1986, № 5.
7. Филаретов В.В. Неявный принцип наложения и анализ линейных электрических цепей. — Электричество, 1990, № 3.
8. Пакет прикладных программ. Программное обеспечение математического моделирования. (Алгоритмы и алгоритмические языки). — М.: Наука, 1992.

[26.09.94]

*Автор: Филаретов Владимир Валентинович окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института (УПИ) в 1982 г. В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Алгоритмы символьно-топологического анализа электрических цепей» в Ленинградском государственном техническом университете. Доцент УПИ.*

#### Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие биографические сведения об авторах. В связи с этим просим всех авторов при направлении статьи в редакцию сообщить следующие сведения:

1. Полные имена и отчества всех авторов
2. Какой факультет, какого вуза и когда закончил
3. Когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита
4. Место настоящей работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4–5 предложений) реферат на русском и английском языках, а также ключевые слова.

# Вопросы управления вентильными компенсаторами пассивной мгновенной мощности

ЧАПЛЫГИН Е.Е.

Рассмотрены способы управления компенсаторами неактивной мощности на базе автономных инверторов тока и напряжения. Показана связь способа управления и быстродействия вычислителя мощности с выбором элементов силовой схемы. Рассмотрена возможность подавления искажений тока на частотах ниже сетевой при полном подавлении искажений в области частот выше сетевой частоты.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, компенсаторы пассивной мощности, автономные инверторы, способы управления

The paper considers methods for controlling valve compensators of passive instantaneous power on the basis of autonomous current and tension inverters. It is shown that a control method and a speed of response of a power computer are connected with the choice of power network elements. The paper considers also the possibility of suppressing current distortions at the frequencies less than the network nominal frequency with a simultaneous complete suppression of current distortion at the frequencies higher than the network nominal frequency.

**Key words:** quality of electrical energy, passive power compensators, autonomous inverters, control methods

**Введение.** При большей мощности нелинейных нагрузок в электрической сети необходима компенсация как реактивной мощности сдвига по основной гармонике, так и мощности искажения. Спектральный состав искажающих гармонических составляющих тока сети может быть достаточно богатым, особенно в системах с высокой динамикой, поэтому традиционные способы компенсации гармоник, основанные на использовании  $LC$ -контуров с резонансом напряжений, настроенных на частоты наиболее интенсивных гармоник искажения (например, 5-, 7-, 11-, 13-й и т.д.), в этих случаях недостаточно эффективны. Радикальное подавление искажений способны осуществить компенсаторы, генерирующие в сеть ток  $i_k$  такой формы, что сумма тока потребителя и компенсатора

$$i_1 = i_n + i_k = I_{\text{этм}} \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $I_{\text{этм}}$  — амплитуда эталонного сигнала.

Система «компенсатор—потребитель» в этом случае потребляет синфазный напряжению сети  $u_1$  синусоидальный ток  $i_1$ . Подобный компенсатор компенсирует все неактивные составляющие мощности путем компенсации пассивных составляющих мгновенного тока и, следовательно, мгновенной мощности [1—3].

Такие компенсаторы могут строиться на базе автономных инверторов напряжения (АИН) [1—3] либо тока (АИТ) [3], работающих с высокой частотой коммутации. В цепи постоянного тока инверторов может отсутствовать источник энергии, имеется лишь накопитель энергии — конденсатор  $C$  в АИН (рис. 1,а) либо индуктивность  $L$  в АИТ (рис. 1,б). Стремление к снижению установленной мощности компенсаторов, выполняемых на полностью управляемых вентилях, приводит к их применению совместно с более

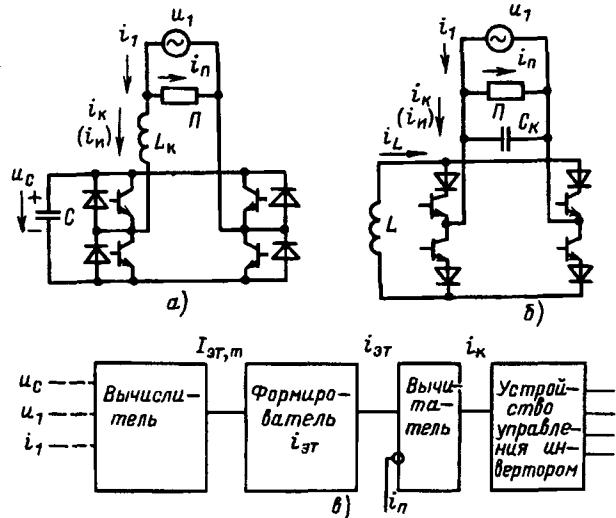


Рис. 1. Схемы однофазных компенсаторов на базе АИН (а) и АИТ (б) и структурная схема системы управления (с)

простыми, традиционными компенсаторами, на базе  $LC$ -фильтров, частично или полностью компенсирующими реактивную мощность сдвига по основной гармонике. В этом случае ток компенсатора на базе инвертора равен по величине и противоположен по знаку пассивной составляющей тока системы, состоящей из потребителя и традиционного компенсатора реактивной мощности сдвига. Далее подобную систему будем называть термином «потребитель», поскольку для компенсатора на базе инвертора не играет роли, какие устройства создают неактивную мощность.

**Основные закономерности.** Работа компенсаторов по схемам рис. 1,а и б характеризуется определенными закономерностями:

1) при мгновенной мощности на входе компенсатора  $p_k = i_k u_1 > 0$  энергия, запасенная в накопителе, увеличивается, и наоборот, при

$p_k < 0$  энергия, запасенная в накопителе, уменьшается;

2) для сохранения постоянства энергии в накопителе от периода к периоду частоты сети необходимо поддерживать равенство

$$P_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_k d\omega t = P_{\text{пот}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{пот}}$  — мощность потерь в элементах компенсатора.

Временные диаграммы, иллюстрирующие работу компенсатора, приведены на рис. 2 (где в качестве примера потребителя использован трехфазный неуправляемый выпрямитель). На рис. 2,2 показана кривая мгновенной энергии  $W_{\text{нак}}$  запасенной в накопительном элементе.

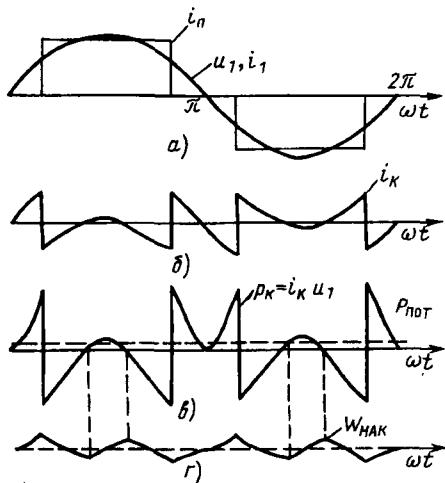


Рис. 2. Временные диаграммы токов и напряжений в системе «компенсатор—потребитель» в установившемся режиме

Автономные инверторы высокочастотной коммутацией могут воспроизводить форму тока  $i_k$  лишь приближенно, так как ток инвертора  $i_n$  изменяется в диапазоне  $i_k - \Delta \leq i_n \leq i_k + \Delta$ , где  $\Delta$  — заданное отклонение. Такое управление может быть осуществлено известным методом двухпозиционного сложения за током [4] либо с помощью различных видов широтно-импульсной модуляции. Высокочастотные составляющие тока  $i_n$  не оказывают сильного влияния на рассматриваемые процессы, низкочастотные части спектров  $i_n$  и  $i_k$  идентичны.

**Системы управления коммутации.** Управление компенсаторами сводится к решению ряда задач, каждую из которых выполняет определенный функциональный блок системы управления (рис. 1,6):

1. Преобразование сигнала, задающего требуемую форму тока  $i_k$ , в закон переключения силовых вентилей инвертора. Эта задача решается упомянутыми выше известными способами.

2. Формирование сигнала  $i_k = i_{\text{эт}} - i_n$  осущест-

вляется вычитателем<sup>1</sup>.

3. Формирование эталонного синусоидального сигнала  $i_{\text{эт}} = I_{\text{эт}} \sin \omega t$ , синфазного основной гармоники напряжения сети. Схемотехнические средства решения этой задачи хорошо известны.

4. Вычисление амплитуды эталонного сигнала  $I_{\text{эт}}$ . Решение этой задачи и является предметом дальнейшего обсуждения.

Успешность решения последней задачи определяет точность выполнения равенства (2). При его невыполнении значение энергии, запасенной в накопительном элементе инвертора, отклоняется от оптимальных значений, обеспечивающих работоспособность инвертора [3].

Мощность потерь в инверторе  $P_n$  складывается из следующих составляющих: 1) потери на проводящих вентилях, пропорциональные току вентиляй; 2) потери на непроводящих вентилях, которые обычно малы; 3) потери при коммутации вентиляй, эта составляющая пропорциональна току, напряжению и частоте коммутации; 4) потери в пассивных компонентах схемы.

Поскольку при любом способе определения  $I_{\text{эт}}$  компенсатор вместе с потребителем потребляет синфазный и синусоидальный ток, то выбор  $I_{\text{эт}}$  не влияет на качество компенсации пассивной составляющей тока сети и мгновенной мощности. Напротив, выбор  $I_{\text{эт}}$  связан с балансом активных мощностей в соответствии с выражением (2). Так как активные мощности передаются только активными составляющими токов, то при дальнейшем рассмотрении выделим из токов всех компенсаторов системы их активные составляющие и ограничимся рассмотрением только этих активных составляющих.

**Сопоставление способов вычисления  $I_{\text{эт}}$ .** Наиболее четко особенности различных способов определения  $I_{\text{эт}}$  выявляются при рассмотрении процесса включения потребителя (или его выключения).

На рис. 3,а представлена временная диаграмма тока  $i_n$ , который при  $t < t_0$  равнялся нулю, а при  $t > t_0$  ток  $i_n = \sqrt{2} I_n \sin \omega t$ .

Способ I характеризуется уравнением

$$I_{\text{эт}} = \sqrt{2} (P_n + \Delta P) / U_1 \quad (3)$$

либо

$$I_{\text{эт}} = \sqrt{2} (I_n + \Delta I) = \sqrt{2} I_n + \frac{\Delta P}{U_1}, \quad (4)$$

где  $P$  — активная мощность потребителя;  $I_n$  — активный ток потребителя;  $\Delta P$  — константа, регламентирующая мощность потерь, роль которой будет обсуждена ниже.

<sup>1</sup> Масштабные коэффициенты, вводимые при обработке сигналов в системе управления, в данной работе опускаются.

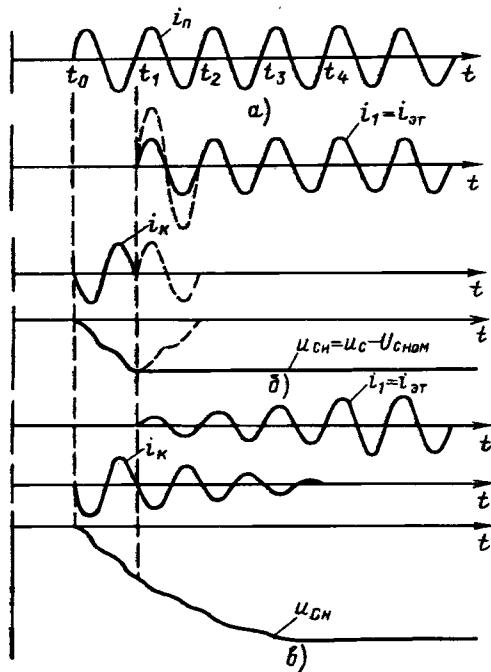


Рис. 3. Временные диаграммы напряжений и активных составляющих токов при включении потребителя в сеть

Минимальное время вычисления активной мощности (или активной составляющей тока) — один период. В этом случае изменение тока  $i_n$  будет скомпенсировано за период (момента  $t_1$  на рис. 3, б, сплошные линии). При больших затратах времени на интегрирование мгновенной мощности или активной составляющей тока процесс затягивается до момента  $t_4$  (рис. 3, б). В этом случае изменение энергии накопительного элемента за время переходного процесса значительно больше. Поэтому применение быстродействующего вычислителя при реализации способа предпочтительнее. Вопросы построения быстродействующих вычислителей средствами микропроцессорной техники рассмотрены в [5].

Вернемся к анализу потерь. При задании  $\Delta P > P_{\text{пот}}$  энергия в накопительном элементе будет возрастать до тех пор, пока увеличение реальных потерь не восстановит равенство  $\Delta P = P_{\text{пот}}$ , если такое изменение режима не вызывает нарушение работоспособности инвертора. Аналогичные при  $\Delta P < P_{\text{пот}}$  уменьшение энергии в накопительном элементе вызовет снижение потерь до уровня  $\Delta P = P_{\text{пот}}$ , если не будет нарушена работоспособность инвертора. Обеспечение условий работоспособности инвертора приводит к тому, что установленная мощность элементов последнего оказывается завышенной, что является существенным недостатком способа.

Этот недостаток способа может в известной мере преодолен, если величина  $\Delta P$  будет задаваться в зависимости от режима работы потреби-

теля и напряжения сети, что осуществимо средствами микропроцессорной техники. В простейшем случае

$$\Delta P = k' I_*, \quad (5)$$

где  $k'$  — коэффициент;  $I_* = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |i_u| d\omega t$ .

Поскольку в установившемся режиме достигается  $P_{\text{пот}} = \Delta P$ , то вслед за переходным процессом установления  $I_{\text{этм}}$ , показанным на рис. 3, б, и в, следует «медленный» переходный процесс установления режима накопительного элемента.

Способ II предложен в [3] и для АИН описывается уравнением

$$I_{\text{этм}} = k_1 (U_{C\max} - u_C), \quad (6)$$

где  $k_1$  — размерный коэффициент;  $U_{C\max}$  — заданное значение;  $u_C$  — реальное значение напряжения на накопительном элементе (в АИТ заменяется током накопительного элемента).

В отличие от способа I здесь энергия, запасенная в накопительном элементе, контролируется, но не стабилизируется. Поскольку в установившемся режиме

$$I_{\text{этм}} = I_{1m} = \frac{\sqrt{2}}{U_1} (P_n + P_{\text{пот}}) = \sqrt{2} \left( I_n + \frac{P_{\text{пот}}}{U_1} \right), \quad (7)$$

то из (6) получим

$$u_C = U_{C\max} - \frac{\sqrt{2} (P_n + P_{\text{пот}})}{k_1 U_1}. \quad (8)$$

При реализации способа II достижимо максимальное быстродействие (см. рис. 3, б, сплошные линии), при котором изменение  $u_C$  за период сети вызывает формирование  $I_{\text{этм}}$ , соответствующее установившемуся режиму. Учитывая (6) и известные соотношения для однофазных инверторов, получаем минимальное значение емкости накопительного элемента, при котором может быть достигнуто максимальное быстродействие,

$$C = \frac{0.9 k_1}{\sqrt{2} f_c}, \quad (9)$$

где  $f_c$  — частота сети.

При увеличении С быстродействие компенсатора снижается (см. рис. 3, в). Отношение  $C/T_{\text{пер}}$  прямо пропорционально  $k_1$ , где  $T_{\text{пер}}$  — время переходного процесса. Для уменьшения максимального напряжения на накопителе, снижения потерь, стабилизации частоты коммутации и снижения установленной мощности инвертора следует увеличивать коэффициент  $k_1$ , при этом растет значение емкости С. Поэтому способ II характеризуется завышенными значениями емкости С.

Достоинством способа II является максимально простая система управления, поскольку вычислитель не содержит сложных узлов для расчета активных составляющих мощности или тока. Необходимо отметить, что непосредственная реализация уравнения (6) может привести к несинусоидальности суммарного тока  $i_1 = i_n + i_c$ , так как величина  $I_{\text{этм}}$  модулирована во времени функцией  $u_C$ , которая при сравнительно небольших значениях емкости  $C$  может иметь значительные пульсации (см. рис. 2). Для исключения этого нежелательного явления, приводящего к неполной компенсации мощности искажения, в выражении (6) следует заменить мгновенные значения  $u_C$  значениями ступенчатой функции, выделяемой из  $u_C$  один раз за период и хранимой в узле выборки и хранения.

Способ III описывается уравнением

$$I_{\text{этм}} = \frac{\sqrt{2} P_n}{U_1} - k_1 u_{Cn}$$

либо

$$I_{\text{этм}} = \sqrt{2} I_n - k_1 u_{Cn} \quad (10)$$

и является синтезом способов I и II (в АИТ величина  $u_C$  заменяется током  $i_L$ ). Здесь  $u_{Cn} = u_C - U_{C\text{ном}}$ , где  $U_{C\text{ном}}$  — напряжение на накопительном элементе АИН, принятое за номинальное.

Первые члены правых частей выражения (10) отражают воздействие на  $I_{\text{этм}}$  изменения активной мощности потребителя, обеспечивая при максимальном быстродействии вычислителя быстрое достижение  $i_{\text{эт}} \approx i_{\text{п.акт}}$ . Как и в способе I длительность переходного процесса компенсации  $T_{\text{пер1}}$  зависит только от быстродействия вычислителя и может достигать  $T_{\text{пер1max}} = 1/f_c$ . Вторые члены упомянутых выражений отражают воздействие режима накопительного элемента  $C$ . В установленном режиме

$$u_C = U_{C\text{ном}} - \frac{\sqrt{2} P_{\text{пот}}}{k_1 U_1}. \quad (11)$$

По сравнению со способом II можно отметить, что отклонение напряжения на накопительном элементе от номинального значения зависит только от сравнительно малых потерь в компенсаторе, поэтому в установленном режиме можно полагать, что  $u_C \approx U_{C\text{ном}}$ .

Переходный процесс установления напряжения на конденсаторе занимает временной интервал  $T_{\text{пер2}}$ . Минимальное время  $T_{\text{пер2min}} = 1/f_c$  достигается при  $k_1 = k_{1\text{max}}$ , временные диаграммы показаны на рис. 3,б (пунктирные кривые). Однако форсированный ввод или вывод энергии из конденсатора достигается за счет резкого увеличения

амплитуды тока  $i_1$ , что нежелательно воздействует на питающую сеть, поэтому выбирают  $k_1 \leq (0,2 \div 0,3) k_{1\text{max}}$  при этом  $T_{\text{пер2}} > (5 \div 7)/f_c$ , но амплитуда тока  $i_1$  практически неизменна.

При высокодинамичной нагрузке, когда ток потребителя может быстро (за несколько периодов) изменяться от  $I_{\text{пmin}}$  до  $I_{\text{пmax}}$  и обратно, при одинаковой емкости  $C$  значение  $U_{C\text{max}}$  при реализации способа III выше, чем при способе II. Это связано с тем, что для поддержания активной мощности системы на время  $T_{\text{пер1}}$ , необходимо обеспечить  $U_{C\text{max}} - U_{C\text{ном}} = U_{C\text{ном}} - U_{C\text{min}}$ . Однако индуктивные сопротивления, как правило, в мощных потребителях ограничивают скорость нарастания и спада тока  $I_n$ . Если интервал изменения тока  $i_n$   $T_{\text{пот}} \gg T_{\text{пер2}}$  либо приращения малы, то можно считать быстродействие контура обратной связи, стабилизирующего режим накопительного элемента, достаточным, тогда отклонения  $u_C$  от  $U_{C\text{ном}}$  будут малы и реализация способа III позволит заметно уменьшить  $U_{C\text{max}}$  по сравнению со способом II. К другим достоинствам способа III относятся возможность независимого управления параметрами переходного процесса, которые при реализации способа II связаны однозначными зависимостями, а также возможность использования конденсаторов с емкостью, меньшей чем значение емкости, вычисляемое по (9). Недостатком способа III является необходимость построения достаточно сложного вычислителя, как и в способе I.

**Заключение.** Проектирование систем управления компенсаторами инверторного типа представляет собой сложную системную задачу. Достижение максимального быстродействия связано с тем, что активная составляющая тока  $i_n$  оказывается модулированной во время низкой частотой (частота субгармоники), как и активная мощность потребителя. При малом  $T_{\text{пер1}}$  компенсатор не обеспечивает полного подавления гармонических искажений тока сети с частотами ниже сетевой (субгармоник). Субгармоники могут быть ослаблены, если  $T_{\text{пер1}}$  будет увеличено, но при этом выравнивание потребителя активной мощности системой «потребитель — компенсатор» достигается за счет увеличения энергии, запасаемой в накопительном элементе, что требует увеличения установленной мощности накопительного элемента. Степень подавления субгармонических составляющих определяется технико-экономическими показателями системы в целом.

В данной статье рассмотрена работа лишь однофазного компенсатора. В трехфазных несимметричных сетях использование группы инверторных компенсаторов с общим накопительным элементом и единым значением амплитуды эталонного сигнала позволяет добиться в установ-

вившихся режимах полной симметрии сети за счет компенсации мощности несимметрии. Анализ предлагаемых способов управления и выбор элементов силовой схемы и системы управления заслуживает отдельного рассмотрения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Супропович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Зиновьев Г.С. Вентильные компенсаторы реактивной мощности, мощности искажений и мощности несимметрии на базе инвертора напряжения. — Современные задачи преобразовательной техники. Ч. 2. — Киев: Изд. АН УССР, 1975.
3. Лабунцов В.А., Чжан Дайжун. Однофазные полупроводниковые компенсаторы пассивной составляющей мгновенной мощности. — Электричество, 1993, № 12.

4. Олещук В.И., Чаплыгин Е.Е. Вентильные преобразователи с замкнутым контуром управления. — Кишинев: Штиинца, 1982.

5. Чаплыгин Е.Е., Хаммами У. Цифровое управление компенсаторами реактивной мощности. — Электричество, 1992, № 11.

[27.06.94]

*Автор: Чаплыгин Евгений Евгеньевич в 1965 г. окончил радиотехнический факультет Московского энергетического института (МЭИ). В 1974 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию, посвященную вопросам управления непосредственными преобразователями частоты. Доцент кафедры промышленной электроники МЭИ.*

## Модификация модели Джилса—Атертона для учета частотных свойств ферромагнетиков

АМЕЛИН С.А., НОВИКОВ А.А., СТРОЕВ К.Н., СТРОЕВ Н.Н.

Предложена модификация модели Джилса—Атертона, учитывающая зависимость параметров петли перемагничивания от скорости перемагничивания. Приведена методика нахождения коэффициентов модифицированной модели. Приведены результаты экспериментальной проверки модели для аморфного магнитного материала 84KXCP.

**Ключевые слова:** ферромагнитный материал, модель Джилса—Атертона, скорость перемагничивания, потери в сердечнике

**Введение.** Из многообразия моделей, описывающих процессы перемагничивания ферромагнетиков [1—2], наиболее часто используется модель Джилса и Атертона [3], которая при ощущимой простоте дает довольно высокую точность моделирования на постоянной частоте перемагничивания магнитного материала. Этим обстоятельством, очевидно, объясняется и тот факт, что указанная модель заложена в одной из наиболее мощных современных систем моделирования электронных схем PSpice (версии 5.1 и выше) [4].

Анализ современных устройств преобразовательной техники вызывает необходимость моделирования магнитных компонентов, работающих в широком диапазоне частот перемагничивания, причем процессы в магнитном материале зачастую имеют решающее значение для устройства в целом. Такой спецификой обладают преобразователи на основе магнитно-связанных фильтров,

*A modified Jiles's and Atherton's model, which takes into account the dependence of loop magnetization parameters on the magnetic reversal speed is proposed. A method for calculating model parameters is presented. Results of experimental tests of a model for amorphous magnetic material 84KXCP are given.*

*Ключевые слова:* ferromagnetic materials, Jiles's and Atherton's model, magnetic reversal, core loss

с LCD-цепями формирования траектории переключения активных полупроводниковых приборов [5] и т. п. В то же время, модель Джилса—Атертона при переменных значениях скорости перемагничивания дает очень большие расхождения с экспериментальными результатами. Сказанное определяет необходимость модификации модели и выработки методики нахождения ее параметров на основе проведения экспериментальных исследований магнитных материалов в широком диапазоне частот перемагничивания.

Как известно, модель Джилса—Атертона имеет два уровня сложности. В [6] описана методика определения приближенных значений коэффициентов модели второго уровня, основанная на проведении серии экспериментов по перемагничиванию образца магнитного материала в заданных режимах. Там же показано, что более сложная модель первого уровня практически не повышает точности моделирования, так как в ней учитываются изменения лишь малосигнальных пара-

метров модели от частоты. Представляется целесообразным, таким образом, вести работы по модификации модели второго уровня.

**Основные уравнения модели Джилса—Атертона.** Совокупность алгебраических и дифференциальных уравнений, совместное решение которых позволяет рассчитать петлю перемагничивания, имеет следующий вид:

$$M_{an}(H) = M_s \frac{H/A}{|H/A| + 1}; \quad (1)$$

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_{an} - M}{K} \delta + \frac{C}{1+C} \frac{dM_{an}}{dH}; \quad (2)$$

$$B = \mu_0 (M + H). \quad (3)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная;  $B$  — индукция, Тл;  $H$  — напряженность внешнего магнитного поля, А/м;  $M$  — намагниченность, А/м;  $M_s$  — намагниченность насыщения, А/м;  $A$  — коэффициент формы безгистерезисной кривой, А/м;  $K$  — коэрцитивная сила [6] для выбранного режима перемагничивания, А/м;  $\delta$  — коэффициент, принимающий значение +1, -1, 0 в зависимости от направления перемагничивания и текущего положения рабочей точки на петле перемагничивания [6];  $C$  — постоянная упругого смещения доменных границ.

Подробная расшифровка значений коэффициентов и способа их определения приведена в [6]. Интегрирование полного дифференциального уравнения (2) по переменной  $H$  совместно с (1) и подстановка полученных значений  $M(H)$  в уравнение (3) дает расчетную форму петли перемагничивания. В простейшем случае может быть принят синусоидальный закон изменения напряженности внешнего магнитного поля:

$$H(t_k) = H_m \sin(2\pi F t_k), \quad (4)$$

где  $k$  — номер шага расчета,  $k=0, 1, \dots, N$ ;  $H_m$  — амплитуда напряженности магнитного поля, А/м;  $N$  — число точек расчета на периоде;  $F$  — частота перемагничивания, Гц;  $t_k$  — текущее время [ $t_k = k/(NF)$ ]. (5)

Итерационная формула для расчета по методу Эйлера имеет вид

$$M_{k+1} = M_k + \frac{(M_{an,k} - M_k) \delta_k}{K} (H_{k+1} - H_k) + \\ + \frac{C (M_{an,k+1} - M_{an,k})}{C + 1}, \quad (6)$$

где  $\delta_k$  определяется на каждом шаге расчета,  $M_0 = 0$ .

Несложно видеть, что после подстановки (5) в (4) время в явном виде не присутствует в уравнениях перемагничивания, что приводит к независимости формы петли от скорости пере-

магничивания. Погрешности метода в целом определяются лишь числом точек расчета на периоде  $N$ .

**Введение частотной зависимости.** Многочисленные эксперименты, проведенные с помощью автоматизированного программно-аппаратного комплекса [7], позволили установить, что основным параметром, характеризующим динамические свойства, и прежде всего потери в большинстве ферромагнитных материалов (в частности, аморфных магнетиков) является зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  от скорости перемагничивания. В табл. 1 приведены результаты экспериментальных исследований аморфного магнитного материала 84КХСР (образец типоразмера  $K16 \times 10 \times 6,5$ ) для сетки частот и амплитуд магнитных индукций  $B_m$ .

Таблица 1

F, кГц	Значения $H_c$ и $H_m$ , А/м, при		
	$B_m = 0,2$ Тл	$B_m = 0,3$ Тл	$B_m = 0,4$ Тл
10	0,6/5,0	1,5/8,0	2,4/14,5
20	1,2/5,4	2,1/8,9	3,5/18,0
30	1,8/5,7	2,7/9,4	4,3/27,0
40	2,2/5,8	3,4/10,7	5,2/28,0
50	2,7/7,4	4,1/11,5	6,3/29,0

Примечание. В числителе указаны значения  $H_c$ , в знаменателе  $H_m$ .

Анализируя таблицу, несложно видеть, что рост коэрцитивной силы происходит с увеличением скорости перемагничивания материала, независимо от того, какими причинами (увеличением амплитуды напряженности магнитного поля или частоты перемагничивания) она вызвана. Таким образом, корректировку модели Джилса—Атертона для учета частотных свойств магнитного материала целесообразно проводить путем выявления зависимости  $H_c$  от скорости перемагничивания.

Как видно из структуры модели (1)–(3), введение зависимости коэрцитивной силы от скорости перемагничивания наиболее просто осуществляется путем установления связи мгновенных значений коэффициента  $K$  от производной  $dH/dt$ . Рассмотрим усредненную по модулю за период скорость перемагничивания  $|dH/dt|_{cp}$ .

$$|dH/dt|_{cp} = F \int_0^T \left| \frac{dH(t)}{dt} \right| dt \quad (7)$$

и сопоставим экспериментальные значения  $H_c$  и  $|dH/dt|_{cp}$  (рис. 1). Как видно из рисунка, между ними существует хорошо обусловленная зависимость вида

$$H_c = H_{c0} + K_{hcf} |dH/dt|_{cp}, \quad (8)$$

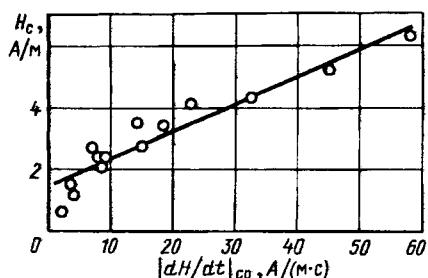


Рис. 1. Результаты регрессионного анализа зависимости коэрцитивной силы  $H_c$  материала 84ХСР от средней скорости перемагничивания (○ — экспериментальные точки)

где  $H_{c0}$ ,  $K_{hcf}$  — коэффициенты линейной регрессии, в данном случае

$$H_{c0} = 1,39 \text{ A/m}, K_{hcf} = 9,14 \cdot 10^{-7} \text{ с.} \quad (9)$$

Воспользовавшись соотношением (8), будем считать его верным для мгновенных значений скорости перемагничивания и коэрцитивной силы материала, т. е. параметра  $K$  уравнения (2). При этом полное уравнение перемагничивания примет вид

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_{an} - M}{H_{c0} + K_{hcf} |dH/dt|} \delta + \frac{C}{1+C} \frac{dM_{an}}{dH}, \quad (10)$$

а итерационная формула для его расчета —

$$M_{k+1} = M_k + \frac{(M_{an\ k} - M_k) \delta_k}{H_{c0} + K_{hcf} |(H_{k+1} - H_k) NF|} (H_{k+1} - H_k) + \frac{C (M_{an\ k+1} - M_{an\ k})}{C + 1}. \quad (11)$$

**Проверка модифицированной модели** осуществлялась путем сравнения расчетных и экспериментальных петель гистерезиса в диапазоне частот перемагничивания 10–50 кГц и амплитуд магнитной индукции 0,2–0,4 Тл. Базовые параметры модели (кроме  $H_{c0}$  и  $K_{hcf}$ ), определенные по методике [6] для средней частоты диапазона — 30 кГц, имеют следующие значения:

$$M_s = 400 \cdot 10^3 \text{ А/м; } A = 3,9 \text{ А/м; } C = 0,11; \\ K = 2,7 \text{ А/м.}$$

Динамические коэффициенты модифицированной модели определены соотношениями (11). На рис. 2, а и б приведено сравнение результатов расчета и эксперимента для частот 10 и 50 Гц, соответственно, и амплитуды магнитной индукции 0,3 Тл. Пунктиром изображены расчетные петли, построенные для базовой модели Джилса–Атертона. Как видно из рисунков, модифицированная модель дает существенно меньшую погрешность моделирования по сравнению с базовой, прежде всего в отношении точности моделирования важнейшего параметра материала —

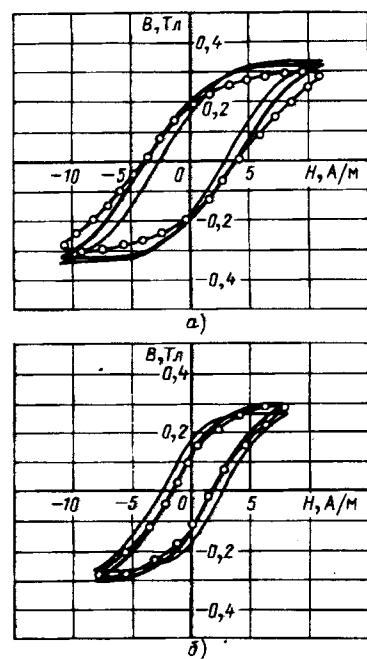


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные петли гистерезиса для двух частот перемагничивания: а — 10 кГц; б — 50 кГц (○○○○ — эксперимент; — расчет по модифицированной модели; ····· — расчет по базовой модели)

коэрцитивной силы  $H_c$ . Данные расчета и эксперимента во всем диапазоне скоростей перемагничивания приведены в табл. 2, где  $H_c$  — экспериментальное значение коэрцитивной силы;  $H_{cc}$  — расчетное значение по базовой модели;  $H_{cf}$  — расчетное значение по модифицированной модели.

Таблица 2

F, кГц	Значения коэрцитивной силы, А/м		
	$H_c$	$H_{cf}$	$H_{cc}$
10	0,6/1,5/2,4	0,8/1,5/2,2	1,9/2,0/2,5
20	1,2/2,1/3,5	1,3/2,0/3,0	2,0/2,1/2,6
30	1,8/2,7/4,3	2,1/2,5/4,3	2,1/2,2/2,7
40	2,2/3,4/5,2	2,1/3,1/5,5	2,2/2,3/2,8
50	2,7/4,1/6,3	3,0/4,1/6,5	2,3/2,4/2,9

Примечание. Первая цифра характеризует значение коэрцитивной силы при  $B_m = 0,2$  Тл, вторая — при  $B_m = 0,3$  Тл, третья — при  $B_m = 0,4$  Тл.

Оценка среднеквадратического отклонения  $\Delta$  расчетных и экспериментальных значений коэрцитивной силы во всем диапазоне частот и индукций дает следующие величины:

$$\Delta H_{cf} = 5\%, \Delta H_{cc} = 18\%,$$

что свидетельствует о существенном улучшении точности моделирования.

**Уточненный расчет потерь.** Модифицированная модель позволяет проводить точный расчет

потерь в сердечнике магнитопровода в сложных режимах перемагничивания. Итерационная формула для численного расчета энергии потерь в единице объема имеет вид

$$W_{k+1} = W_k + \Delta B_k \frac{H_{k+1} + H_k}{2}, \quad (12)$$

где  $W_k$  — текущее значение энергии потерь, Дж;  $\Delta B_k$  — приращение индукции на очередном шаге интегрирования, Тл.

Усреднение напряженности на каждом шаге интегрирования позволяет повысить точность вычислений, особенно при расчете узких петель гистерезиса. Удельная мощность потерь в единице объема  $P_v$ , при этом

$$P_v = F W, \quad (13)$$

где  $W$  — энергия потерь за один цикл, Дж.

Сравнительный анализ результатов расчета потерь по базовой ( $P_{vc}$ ) и модифицированной ( $P_{vf}$ ) модели дает величины среднеквадратического отклонения расчетных и экспериментальных значений по диапазону:  $\Delta P_{vf} = 18\%$ ,  $\Delta P_{vc} = 33\%$ .

Таким образом, модифицированная модель позволяет существенно улучшить точность расчета потерь в магнитном материале в широком частотном диапазоне. Это позволяет рекомендовать данную модель для расчета потерь в ферромагнитных сердечниках при переменной частоте перемагничивания.

**Выводы.** Предложена модификация модели Джилса—Атертона, которая позволяет учесть динамические свойства ферромагнитного материала. Предложена методика расчета коэффициентов модифицированной модели и получены итерационные формулы для расчета петель перемагничивания при заданной форме напряженности намагничающего поля. Показано, что ошибки при моделировании петель перемагничивания и расчете потерь в широком частотном диапазоне с помощью модифицированной модели могут быть сокращены до приемлемого инженерного уровня.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The application of the Preisach model in magnetodynamics: theoretical and practical aspects / D. Philips, L. Dupre, J. Cnops, J. Melkebeek. — Journal of magnetism and magnetic materials, 1994, vol. 133, No 1—3.
2. Riberio Lopes A. Characterization of soft magnetic materials using a modified Stoner—Wohlfarth model. — Journal of magnetism and magnetic materials, 1994, vol. 133, No 1—3.
3. Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis. — Journal of magnetism and magnetic materials, 1986, vol. 61, No 6.
4. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ (4-е выпуск). — М.: Радио и связь, 1992.
5. Поликарпов А.Г., Амелин С.А. Коммутируемые однотактные преобразователи напряжения. — Электросвязь, 1994, № 10.
6. Новиков А.А., Амелин С.А. Экспериментальное определение параметров модели перемагничивания Джилса—Атертона. — Электричество, 1995, № 9.
7. PC-controlled complex for measuring parameters of soft magnetic materials at frequencies as high as 5 MHz / A. Novikov, N. Stroyev, K. Stroyev, A. Shiriaev. — Journal of magnetism and magnetic materials, 1994, vol. 133, No 1—3.

[23.01.95]

**Авторы:** Амелин Сергей Александрович окончил факультет автоматики и электронной техники Смоленского филиала МЭИ в 1992 г. Аспирант кафедры «Промышленная электроника» МЭИ.

Новиков Александр Альбертович окончил факультет электронной техники Московского энергетического института (МЭИ) в 1979 г. В 1982 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию по теме «Многоячейковые источники вторичного электропитания на основе транзисторных преобразовательных модулей». Доцент кафедры «Промышленная электроника» Смоленского филиала МЭИ.

Строев Константин Николаевич окончил факультет автоматики и электронной техники Смоленского филиала МЭИ в 1981 г. Старший преподаватель кафедры «Промышленная электроника» Смоленского филиала МЭИ.

Строев Николай Николаевич окончил факультет автоматики и электронной техники Смоленского филиала МЭИ в 1985 г. Ассистент кафедры «Промышленная электроника» Смоленского филиала МЭИ.

## О неизвестных опытах по электромагнитной индукции

(статья Родина А.Л., «Электричество», 1994, № 7)

ШАТАЛОВ А.С.

Эксперименты в [1] заслуживают бесспорного уважения. Часть выводов автора дискуссионна, но совершенно неприемлема концепция о бесстаторном униполярном электродвигателе, конструкция которого приведена в [1] на рис. 4.

В этой конструкции в одном и том же магнитном поле находятся диск (ротор) и горизонтальные участки скобы корпуса. Через диск и скобу протекает один и тот же ток, поэтому момент реакции на скобе равен врачающему моменту, развиваемому диском, т. е. скобы являются активной частью статора.

Сама постановка вопроса о создании бесстаторного двигателя (генератора), по-видимому, правомерна не для электрической машины, а для привода (двигатель и нагрузка), в целом. Предложим решение этой проблемы для униполярных двухдисковых (в отличие от [1]) машин в рамках конструкции, показанной на рис. 1.

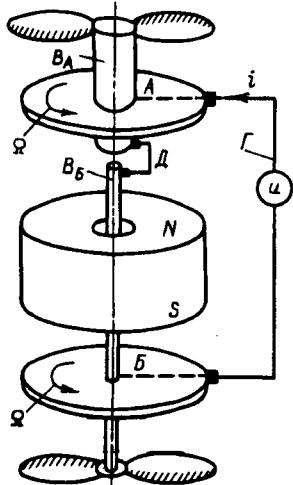


Рис. 1

Диски  $A$  и  $B$  насыжены на независимо вращающиеся валы  $B_A$ ,  $B_B$ , между которыми имеется электрический контакт, осуществляемый щеточным устройством  $D$ . Со стороны периферии диски  $A$  и  $B$  электрически связаны между собой с помощью неподвижного щеточного устройства  $\Gamma$ . Таким образом, создается электрический контур: диск  $A$ , вал  $B_A$ , щеточное устройство  $D$ , диск

$B$ , щеточное устройство  $\Gamma$ , в цепь которого включен источник питания электродвигателя с напряжением  $u$ . Вызванный им ток  $i$  проходит в диске  $A$  от периферии к валу и в диске  $B$  — от вала к периферии, поэтому диски вращаются в разные стороны. Действующий на каждый из дисков электромагнитный момент [3]

$$M = \Phi i / 2\pi \quad (1)$$

одновременно служит передаваемой через поле реакцией для момента, действующего на другой диск. Участки контура  $\Gamma$ ,  $D$  моментом не нагружены, то же самое можно сказать о моменте, действующем на осесимметричный постоянный магнит. А это означает, что равен нулю общий момент, действующий на статор двигателя, который состоит из постоянного магнита  $NS$ , участков контура  $\Gamma$ ,  $D$  и соответствующих крепежных конструкций, образующих корпус. Если диски  $A$  и  $B$  жестко соединить с пропеллерами, имеющими различные по знаку углы атаки, то конструкция будет развивать подъемную силу без реакции на опору статора от врачающего момента. В режиме насоса рассматриваемая конструкция помещается в трубопровод и ее крепление к стенкам должно быть жестким только в осевом направлении для восприятия силовой нагрузки от прогоняемой насосом жидкости (конструкция капсулы и изолирующих устройств здесь не обсуждается).

В генераторном режиме двухдисковая конструкция может быть использована для измерения скорости потока жидкости в трубопроводе.

Такой гидротахометр также будет иметь только силовую реакцию на крепление капсулы к трубе без реактивного момента.

Эта особенность может заинтересовать конструкторов малогабаритных космических аппаратов.

Но вернемся к однодисковым конструкциям униполярных машин, обсуждаемым в [1 и 2]. Нельзя также обойти внимание отзыв на [1]. Института физических проблем, на который в [1] имеется краткая ссылка. Включаясь в дискуссию, чтобы охватить экспериментальные режимы вышеупомянутых авторов и реальные ре-

жимы, описываемые в более ранних публикациях [3–5], введем в рассмотрение универсальную модель униполярной машины УМУМ, показанную на рис. 2 и имеющую много степеней свободы, в том числе для независимого вращения токосъемов и цилиндрического магнита, что дополняет степени свободы, использованные на рис. 1. Проследим формирование контура  $ABBG$  в УМУМ. Он состоит из плеча  $A$ , связывающего через внутренние и внешние щетки токопроводящий вал с токосъемным кольцом  $TCK$ , токопроводящего диска  $B$  и участков  $B$ ,  $G$ , осуществляющих электрическое соединение  $A$  и  $B$ .

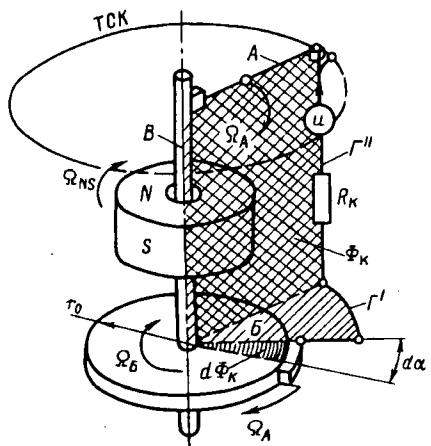


Рис. 2

Постоянный магнит  $NS$  создает симметричное относительно оси  $B$  поле. Обозначим угловые скорости, которые можно придать элементам УМУМ как:  $\Omega_A$  — для плеча  $A$ ;  $\Omega_B$  — для диска  $B$ ;  $\Omega_{NS}$  — для цилиндрического магнита;  $\Omega_G$  — для внешнего соединения  $G$  вместе с токосъемным кольцом  $TCK$ .

В соответствии с законом электромагнитной индукции ЭДС в контуре  $ABBG$  будет [3]:

$$|e| = \frac{d\Phi_k}{dt}, \quad (2)$$

где  $\Phi_k = \int B dS$  — магнитный поток через поверхность  $S_{ABBG}$ , опирающуюся на контур  $ABBG$ .

Из рис. 2 видно, что магнитный поток проходит в контур только через однократно заштрихованный сектор диска, стягиваемый дугой  $G''$ , а остальная часть контура, заштрихованная дважды, скользит вдоль потока и в его приращении  $d\Phi_k$  не участвует. Поэтому дальнее (рис. 3, a–г) будем иметь дело только с проекциями плеча  $A$  на поверхность диска. Ориентация радиуса  $B$  на диске изображена произвольно, так как для каждой радиальной линии тока скорость приращения площади сектора, влияющая на (2), неизменна.

Итак, какая же степень свободы, представленная в УМУМ, может быть использована, чтобы  $\Phi_k$  (3) имел непрерывную производную по времени? Очевидно, бесполезно вращать токосъемы, т.е. участок  $G$  вместе со щетками на диске и токосъемным кольцом, контактирующим с плечом  $A$ , так как это не дает приращения площади сектора (между плечом  $A$  и каждой радиальной линией тока  $B$ ), поэтому полагаем  $\Omega_G=0$ . Также бесполезно вращать магнитный цилиндр, поскольку  $\Omega_{NS}$  вообще не входит в предыдущие формулы для ЭДС, т.е.  $\Omega_{NS}=0$ .

Могут обсуждаться конструкции, в которых цилиндрический магнит связан подвижными элементами контура  $A$ ,  $B$  или имеет свободное вращение, тогда  $\Omega_{NS}=\Omega_B$ ,  $\Omega_{NS}=\Omega_A$  или  $\Omega_{NS}=\text{var}$ . Но варианты связок изменяют только момент инерции вращающихся частей, а на возникновение ЭДС в контуре не влияют.

Одновременное (связанное) вращение плеча  $A$  и диска  $B$ , как показано в проекциях на рис. 3, a, сохраняет низменными активную площадь контура и пропускающий ее поток. Но, если  $\Phi_k=\text{const}$ , то  $\frac{d\Phi_k}{dt}=0$ , и ЭДС в контуре согласно (2) не наводится. Этот результат является следствием более общего режима, когда элементы  $A$  и  $B$  вращаются с различными скоростями.

Для универсальной модели вместо (2) будем использовать вытекающую из нее и рис. 3 формулу

$$|e| = \frac{\Phi}{2\pi/(\Omega_A - \Omega_B)} = \Phi (\Omega_A - \Omega_B)/2\pi, \quad (3)$$

где знаменатель средней части (3) равен времени  $\Delta t$  накопления полного магнитного потока в контуре, образованном плечом  $A$  и любым (каждым) радиусом диска  $B$ . Подставляя в (3) условие связанного вращения элементов  $A$  и  $B$   $\Omega_A=\Omega_B$ , снова получим

$$|e|_a = 0. \quad (3a)$$

Перейдем теперь к использованию степеней свободы УМУМ, обеспечивающих генерирование ЭДС и иллюстрируемых рис. 3, б, в, г: для неподвижного плеча  $A$  и вращающегося диска  $\Omega_A=0$ ,  $\Omega_B=\Omega$ ; для неподвижного диска  $B$  и вращающегося  $A$ , когда  $\Omega_B=0$ ,  $\Omega_A=\Omega$ ; для вращающихся в разные стороны  $A$  и  $B$  со скоростями  $|\Omega_A|=|\Omega_B|=\Omega/2$ . Для всех этих режимов, обсуждавшихся в [1, 2] и на рис. 1, справедлива формула (3), принимающая вид

$$|e| = \Phi \Omega/2\pi. \quad (3b)$$

Ток в контуре, взаимодействуя на активных участках  $A$  и  $B$  с магнитным полем, вызывает электромагнитный момент (1). Для УМУМ уни-

$$i = (u - e)/R \quad (5)$$

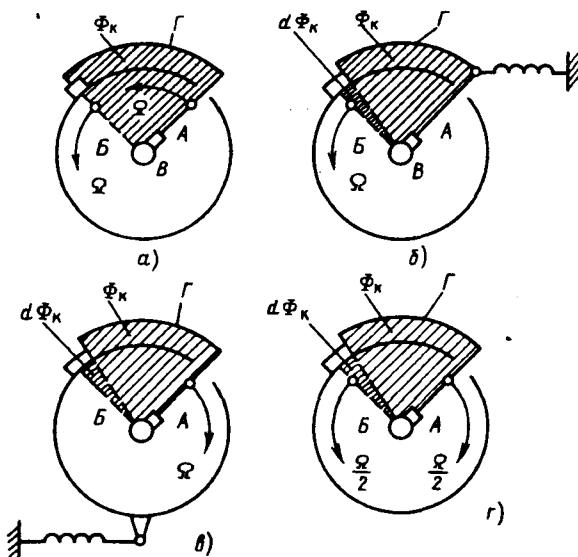


Рис. 3

версальная формула момента будет

$$M = \frac{ei}{\Omega_A - \Omega_B}. \quad (4)$$

Этот момент преодолевается первичным двигателем, вращающим подвижный элемент униполярного генератора, и может быть измерен как момент реакции на неподвижном элементе при помощи динамометра, пружины которого показаны на рис. 3, б и в. Для рис. 3, г элементы *А* и *Б* взаимно нагружают друг друга, создавая бесстаторную УМ, как и рассмотренную на рис. 1.

Таким образом, подвижный элемент контура взаимодействует в своем движении с неподвижным через поле магнита, не вовлекая в эту динамику массу магнита. Силы в самом контуре противодействуют деформации контура, приводящей к изменению его активной площади, определяющей  $\Phi_K$ .

В двигательном режиме ток в контуре

также без вовлечения в динамику массы магнитов, напротив, стимулирует изменение активной площади контура, создавая движущий момент на вращающемся элементе контура и момент реакции на неподвижном элементе.

На рис. 3, б и в, если направления токов от внешнего источника согласованы с направлениями вызванных токами скоростей (показанных стрелками на рисунках), иллюстрируется «отталкивание» подвижного элемента от неподвижного с реакцией на пружины динамометра; рис. 3, г иллюстрирует взаимное «отталкивание» элементов *А* и *Б*. Такая модель взаимодействия элементов замкнутого контура позволяет наглядно пояснить результаты экспериментов в [1].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родин А.Л. О неизвестных опытах по электромагнитной индукции. — Электричество, 1994, № 7.
2. Иванов-Смоленский А.В. Комментарий к статье «О неизвестных опытах по электромагнитной индукции». — Электричество, 1994, № 7.
3. Бертинов А.И., Алиевский Б.Л., Троицкий С.Р. Униполярные электрические машины. — М.—Л.: Энергия, 1966.
4. Алиевский Б.Л. Дискуссия по статьям Львова Е.Л. и Иванов-Смоленский А.В. — Электричество, 1988, № 10.
5. Иванов-Смоленский А.В. Математическое описание электромеханических процессов в электрических машинах. — Электричество, 1969, № 12.

Автор: Шаталов Александр Степанович окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института в 1938 г. и Военную артиллерийскую академию (ВАА) им. Ф.Э. Дзержинского в 1943 г. В 1950 г. защитил докторскую диссертацию по электрическим счетно-решающим приборам управления в ВАА им. Ф.Э. Дзержинского. Работает в НПО «Антей».

## Выдающийся электротехник и пропагандист электротехнических знаний

(К 150-летию со дня рождения Владимира Николаевича Чиколева (1845—1898)



ШНЕЙБЕРГ Я.А.

«В славной плеяде русских деятелей, занявших почетное место в истории электротехники, Владимир Николаевич Чиколов занимает особое положение»

*Люди русской науки, т. II. — М.; Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948, с.978*

стенографистом), успешно закончил в 1867 г., и поступил на должность лаборанта по физике в Петровскую земледельческую (позже Тимирязевскую) академию. В это время он увлекся светодиодикой, и вскоре вышла его книга «Руководство к приготовлению и сжиганию фейерверков», которая получила высокую оценку специалистов и выдержала несколько изданий.

В учебной программе академии физике уделялось небольшое число часов, поэтому В.Н. Чиколов уходит из академии и после небольшого перерыва поступает в Московское высшее техническое училище (1870 г.). Здесь успешно развернулась его изобретательская деятельность. Уже в 1872 г. он создает электродвигатель для швейной машины<sup>1</sup> и усовершенствует конструкции гальванических элементов. Изобретения В.Н. Чиколова демонстрировались в 1872 г. на Московской политехнической выставке и были удостоены золотой и серебряной медалей. Он принимал активное участие в организации Всероссийской политехнической выставки и в создании московского Политехнического музея.

В 1876 г. В.Н. Чиколов переехал в Петербург и поступил на службу в электротехнический отдел Главного артиллерийского управления, где проработал до конца своих дней.

**Создание дифференциальной дуговой лампы.** Работа в военном ведомстве по артиллерийской части, естественно, накладывала отпечаток на тематику электротехнических исследований. В частности, большое внимание В.Н. Чиколов уделял безопасности применения электричества в артиллерийских мастерских и на военных заводах, а

<sup>1</sup> В Америке первая известная швейная машина с электроприводом была создана в 1880 г.

наиболее известное изобретение Чиколева — дуговая электрическая лампа с оригинальным дифференциальным регулятором, где впервые в мировой электротехнической практике был применен принцип электромашинного регулирования, была предназначена для освещения на дальнее расстояние. Под его руководством была создана особая электротехническая лаборатория Главного артиллерийского управления.

Над дуговыми лампами В.Н. Чиколев начал работать еще в 1865 г. Как известно<sup>2</sup>, являясь мощным источником света, эти лампы имели существенный недостаток — они требовали регулирования расстояния между электродами. Кроме того, при включении в цепь нескольких электромагнитных регуляторов дуги в каждой лампе получались различные длины.

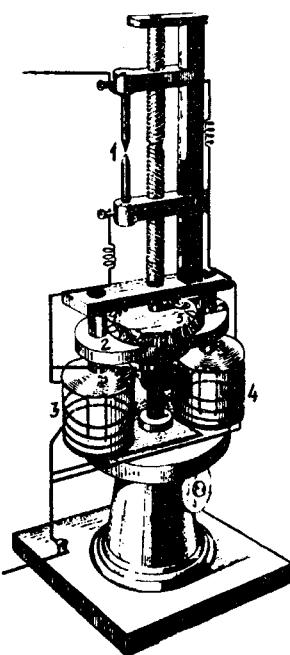
Стремясь устранить этот недостаток, В.Н. Чиколев разработал дифференциальную схему включения двух обмоток регулятора: одну последовательно с электродами, другую — параллельно.

Вначале по заказу Артиллерийского ведомства он усовершенствовал и известную лампу Фуко, применив принцип дифференциального регулирования, и в 1874—1877 гг. было изготовлено шесть усовершенствованных ламп.

Проделав много экспериментов, В.Н. Чиколев в 1879 г. создал оригинальную дифференциальную лампу с электромагнитным регулятором (см. рисунок). Обмотка электромагнита 3 электродвигателя включалась последовательно с углями 1, а обмотка электромагнита 4 — параллельно; обмотка якоря электродвигателя 5 включалась параллельно с электромагнитом 3. Действие электромагнитов было встречным, т. е. в любой момент преобладало действие одного, либо другого электромагнита. Если при обгорании углей дуга удлинялась, то преобладало воздействие параллельной обмотки, и якорь вращался в таком направлении, при котором угли сближались; при чрезмерном сближении углей преобладало действие последовательной обмотки, направление магнитного потока между полюсными наконечниками изменялось, и якорь двигателя начинал вращаться в противоположную сторону, раздвигая угли.

Одним из важных достоинств этой лампы было то, что ее световой центр практически не изменял своего положения, т. е. лампа обладала свойством, особенно ценным для практической техники. Возможное небольшое смещение светового центра могло регулироваться специальной рукояткой.

В последующие годы В.Н. Чиколев продолжал усовершенствовать конструкции дифференциальных ламп. Так, в 1881 г. он изобрел лампу с двумя электродвигателями, включенными дифференциально, сводившими или разводившими угли, а в 1883 г. — лампу, в которой элек-



Дуговая лампа В.Н. Чиколева с электромагнитным регулятором

тродвигатели были заменены электромагнитами, воздействовавшими на углеродные катушки с помощью специальных рычагов. На обе эти конструкции им были получены русские привилегии (в 1882 и 1883 гг.).

В 1886 г. он предложил дифференциальную лампу «тройного действия», предназначенную для военных установок.

Следует отметить, что В.Н. Чиколев с удивительной настойчивостью настаивал на преимуществах дуговых ламп перед лампами накаливания, в частности перед «свечой» П.Н. Яблочкива, с триумфом обошедшей весь мир. Он доказал, что вертикальное (один над другим) расположение углей в дуговых лампах позволяет увеличить продолжительность горения и интенсивность освещения по сравнению с параллельным расположением углей в «свече». Единственное, что удлиняет лампу, — это необходимость в регуляторах, но при дальнейшем усовершенствовании дифференциальных регуляторов дуговой лампе, по его мнению, принадлежит будущее.

Нужно признать, что в отношении применения дуговых ламп в прожекторах В.Н. Чиколев оказался прав; он много сделал для усовершенствования прожекторного освещения.

Что же касается принципа дифференциальных электромагнитных механизмов, впервые разработанных Чиколевым, то они получили позже широкое применение в автоматике, телемеханике, электроизмерительной технике. Это изобретение принесло В.Н. Чиколеву широкую известность и в России, и за рубежом. Описание его дифференциальной лампы было помещено в известном французском электротехническом

<sup>2</sup> См. [6—9].

журнале «La lumière électrique».

Идею создания дифференциального регулятора пытался присвоить известный немецкий предприниматель Шуккерт. Сделав незначительные изменения в конструкции лампы, он сумел получить на нее германскую привилегию. В связи с этим В.Н. Чиколев направил редактору французского журнала резкое письмо, в котором убедительно опровергает попытку Шуккерта. «Конечно, — писал Владимир Николаевич, — мне весьма легко уничтожить патент Шуккерта, но я должен на это терять время и деньги, а пока же не считаю себя вправе умолчать о таком случае перед электриками и предостеречь их от подобных недобросовестных проделок».

И хотя попытки Шуккерта опровергнуть заявление В.Н. Чиколева не увенчались успехом, германского патента на свое изобретение он так и не получил. Как это часто бывало, российские ученые и изобретатели оказывались обкраденными могущественными зарубежными фирмами. Такая участь постигла и дифференциальную лампу: она получила широчайшее распространение под названием лампы Сименса — немецкого электротехника и предпринимателя, возглавлявшего известную на весь мир электротехническую фирму.

**Работы в области прожекторостроения.** Значительная часть исследований В.Н. Чиколева посвящена совершенствованию электрических прожекторов, широко применявшихся в военном деле. Английские специалисты отмечали первенство русских электротехников в этой области и считали, что применение электрических прожекторов во время войны с Турцией в 1877—1878 гг. помогло русским морякам и саперам в защите Черноморского побережья.

В.Н. Чиколевым впервые были разработаны научно обоснованные методы проектирования и определения качества прожектора. Результаты его работ (к которым он привлек двух молодых электротехников, в том числе Р.Э. Классона — впоследствии крупнейшего советского энергетика) были опубликованы в труде «Осветительная способность прожекторов электрического света», изданном по указанию Главного артиллерийского управления в двух частях в 1892 и 1895 гг.

В.Н. Чиколевым был предложен оригинальный метод проверки качеств прожекторов с помощью фотографирования изображений (при помощи «сетки Чиколева»), позволивший обнаруживать недостатки рефлекторов (применяется и в наше время). Этому посвящена одна из частей указанного труда под названием «Проверка прожекторов электрического освещения фотографированием». Метод, предложенный В.Н. Чиколевым, вскоре был использован крупнейшими немецкими и французскими фирмами, изготавлившими электрические прожекторы.

Один из ведущих французских журналов опуб-

ликовал перевод этой работы В.Н. Чиколева, поместив следующее вступление: «Нам казалось весьма интересным перевести для научных работников, не знакомых с русским языком, единственную существенную работу по этому вопросу, являющуюся результатом десятилетних исследований, составленную профессором Чиколевым. Несмотря на то, что труд выполнен три года назад, он кажется нам и ныне совершенно актуальным и, в частности, могущим служить путеводителем для всех, кто интересуется конструкцией прожекторов, захотел бы выяснить себе их теоретические основы»<sup>3</sup>.

Насколько важным был этот труд В.Н. Чиколева, можно судить еще и потому, что он был переведен на немецкий язык и включен в известную серию книг крупнейшего немецкого химика В. Оствальда «Классики точных наук».

В 1883 г. В.Н. Чиколевым была создана оригинальная конструкция прожектора с разборными кольцеобразными составными стеклами. Пуля, попавшая в него, выводила из строя только один элемент оптической системы. Даже в 50-х годах нашего столетия работа В.Н. Чиколева, по мнению известного электротехника и светотехника М.А. Шателена, «...несмотря на весьма большие успехи в теории и конструкции прожекторов за истекшее время, сохранила и до сих пор некоторое значение по заложенным в ней идеям»<sup>4</sup>.

В течение многих лет В.Н. Чиколев занимался проблемами безопасности применения электричества во взрывоопасных помещениях, использованием электричества для воспламенения зарядов. Им было разработано несколько устройств для военно-электротехнических установок, например, электромагнитный взрыватель, особый «фотоэлектрический» способ измерения скорости снаряда, специальные безопасные электрические фонари. Многие его труды были связаны с военной электротехникой: «Применение электрического освещения для военных целей», «Электрическое освещение в применении к жизни и военному искусству», «Электрический свет в крепостной, осадной, береговой и полевой войне» и др.

В.Н. Чиколев был автором учебников для артиллерийских офицеров, которые обучались на организованных им курсах: «Лекции по электротехнике», «Электрические аккумуляторы», «Электрические единицы и измерения», «Теория прожекторов». Военные прожектористы, обученные В.Н. Чиколевым и его сотрудниками, успешно владели новейшим прожекторным вооружением, что было продемонстрировано во время обороны Порт-Артура. В.Н. Чиколева по праву можно назвать одним из основоположников отечественной светотехники.

Несмотря на то, что В.Н. Чиколев отдавал

<sup>3</sup> Шателен М.А. Русские электротехники XIX века.— М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955, с. 243.

<sup>4</sup> Там же.

предпочтение дуговым лампам, он изобрел несколько оригинальных ламп накаливания. Так, еще в 1874 г. он демонстрировал лампу, в которой накаливался тонкий уголек, упирающийся в массивный кусок угля. Однако, убедившись в их «небольшой производительности сравнительно со светом электрической дуги», он не стал добиваться получения привилегии. Спустя несколько лет, другие изобретатели, использовав этот принцип, получили соответствующие привилегии. В 1881 г. на Электротехнической выставке в Париже В.Н. Чиколев демонстрировал лампу, в которой накаливалась не одна, а несколько (3—6) угольных нитей, включенных параллельно; он полагал, что такие лампы более надежны в эксплуатации. Но широкого применения они не получили, хотя для специальных целей иногда и использовались.

**Выдающийся пропагандист электротехнических знаний.** Проведя ряд экспериментальных и экономических исследований, В.Н. Чиколев убедительно показал преимущества электрического освещения перед газовым. Им были прочитаны интересные публичные лекции «Сравнение истории освещений», которые были опубликованы в 1880 г. в первых номерах журнала «Электричество».

Как известно, владельцы газовых компаний, боясь потерять огромные капиталы, пытались всяческими путями скомпенсировать электрическое освещение, угрожая обществу грандиозными катастрофами. И не случайно наши выдающиеся пионеры-электротехники, создатели первых электрических ламп П.Н. Яблочков, А.Н. Лодыгин преодолевали немалые трудности, чтобы внедрить свои изобретения.

«Электрический свет, — писал В.Н. Чиколев, — единственный источник, введение которого в наши жилища не только представляет неприятного соседства, но, наоборот, по сходству этого света с солнечным... он способен действовать на людей и на растения так же живительно, как и солнечный». Он рисует образную картину будущего, когда электрическая энергия будет вырабатываться на «центральных заводах», а затем осуществляться «канализация» энергия к различным потребителям «в нужном количестве». Он подчеркивает возможность широкого использования для получения электрической энергии воды и ветра, а в будущем («хотя это достанется, конечно, уже на долю наших детей») и солнечной энергии.

Большую популярность приобрели две полубеллетристические книги Б.Н. Чиколева «Не быть, но и не выдумка» и «Чудеса техники и электричества», в которых он в популярной форме рассказал о применениях электрической энергии и, что особенно важно, о будущих грандиозных успехах электротехники. Тогда, в 80—90-х годах прошлого века, эти книги, по выражению М.А. Шателена, «блестали новизной идей». Перед читателем раскрывались возможности широкай-

шего применения электрической энергии в промышленности, сельском хозяйстве, быту. Иными словами, речь шла об электрификации в современном смысле этого слова. Он же показал преимущества применения электрической энергии не только с экологической точки зрения, но и сделал интересные экономические сопоставления. В.Н. Чиколев верил в эффективность использования электрической энергии на транспорте, в особенности на водном<sup>5</sup>. Он мечтал о том времени, когда электрификация будет играть огромную роль в повышении культурного уровня и условий жизни народа. Ему казалось целесообразным создание «Международного института для изучения электричества», благодаря которому «русский изобретатель сможет по заслугам занять выдающееся место среди гениев мира». Об интересе, который вызвали книги В.Н. Чиколева, можно судить, в частности, по тому, что книга «Не быть, но и не выдумка» выдержала два издания.

И хотя с точки зрения современных знаний В.Н. Чиколев в некоторых своих суждениях ошибался, его работы сыграли огромную роль в популяризации и пропаганде идей электрификации.

В своих трудах и лекциях В.Н. Чиколев, сравнивая достоинства постоянного и переменного токов, убежденно отдает предпочтение (как и многие другие электротехники) постоянному току, считая, в частности, электродвигатели переменного тока «мало производительными». Даже когда П.Н. Яблочков с помощью трансформаторов блестяще решил проблему «дробления электрической энергии», В.Н. Чиколев оставался верным своим убеждениям. Он предложил «дробить» электрический свет, получаемый от мощного источника, «оптическим» способом, считая его наиболее экономичным. В 1877 г. по его проекту была осуществлена осветительная установка на Охтенском пороховом заводе в Петербурге. Схема оптической канализации света на территории завода была такой. На специальной вышке устанавливалась мощная дуговая лампа (3000 свечей), питавшаяся энергией от магнитоэлектрического генератора фирмы «Альянс». Лучи света от лампы передавались в помещение посредством линз, установленных в жестяных трубах. Внутри помещения близ труб находились специальные патрубки с полусферами из «молочного» стекла, а перед ними в трубах укреплялись под углом 45° к оси большие зеркала, отражавшие свет в патрубках. Для распределения пучка света между несколькими помещениями в первом зеркале снималась часть амальгамы, и пучок света проникал на второе зеркало, а затем мог проходить и на третье. Таким образом В.Н. Чиколев «разделил» свет от

<sup>5</sup> В 1891 г. он создал моторную шлюпку с электродвигателем, питавшимся от 45 аккумуляторов и развивавшим мощность 2 $\frac{1}{4}$  л.с. Этот «электроход» использовался на Охтенских пороховых заводах, где паровой катер был списан из-за возможных взрывов.

одной лампы на 60 «малых источников» с силой света в 15 свечей. Им же была предложена схема дробления света в театральном помещении.

Возможно, для освещения взрывоопасного помещения при технических возможностях того времени указанный способ «канализации» мог быть и оправдан, но, как известно, широкого применения не получил. Тем не менее В.Н. Чиколеву пришлось в 1881 г. защищать свой приоритет в связи с попыткой двух американцев получить патент на «оптическую канализацию света». Он приложил немало усилий и для внедрения «электрических свечей» П.Н. Яблочкива, который с благодарностью отмечал это. Так, им были сделаны специальные расчеты, а затем и световые измерения, показавшие, в частности, выгодность использования дуговых ламп для освещения Литейного моста в Петербурге.

Разработанные В.Н. Чиколевым методы расчета эффективности электрического освещения были обобщены в его труде «Об электрическом освещении улиц, мостов и площадей» — одним из первых в мировой светотехнической литературе. Позднее им был издан «Справочник для электротехников» (1885 и 1896 гг.), ставший для своего времени настольной книгой отечественных электротехников и способствовавший широчайшему внедрению электрической энергии в различные отрасли производства и быта.

**Создание журнала «Электричество».** В.Н. Чиколев был одним из инициаторов основания первого объединения русских электротехников — электротехнического отдела Русского технического общества (РТО) и создания одного из первых в мире специальных электротехнических журналов «Электричество» (1880 г.). Предложение об издании журнала было сделано В.Н. Чиколевым 6 февраля 1880 г. на собрании отдела. Сам Владимир Николаевич был назначен и первым редактором журнала по всем разделам, кроме телеграфии.

Казалось невероятным, чтобы в экономически отсталой России появился один из первых в мире специальный электротехнический журнал (во Франции и Германии аналогичные журналы начали выходить лишь несколькими месяцами раньше). Но мы уже отмечали, что в 70-х годах прошлого века в России сформировалась довольно большая группа видных электротехников-изобретателей, таких как П.Н. Яблочкив, А.Н. Лодыгин, Д.А. Лачинов, В.Н. Чиколев и др., вклад которых в развитие электротехники получил признание во всем мире. Необходимость укрепления усилий электротехнической общественности, координации действий многочисленных изобретателей, обсуждения назревающих научно-технических проблем в связи с быстрым развитием электротехники — все это способствовало созданию нового специального журнала.

Электротехнический отдел РТО и журнал

«Электричество», сыграли огромную роль в объединении усилий отечественных электротехников, пропаганде важнейших достижений передовой электротехнической мысли, в становлении и развитии электрификации России.

В.Н. Чиколев был одним из образованнейших электротехников своего времени. Главным в его творческой деятельности было не изобретательство в узком смысле этого слова, а глубокое изучение явлений и процессов в электромагнитных устройствах, неустанное стремление найти им широкое практическое применение. Как правило, все его технические замыслы отличались прогрессивностью и глубиной анализа. В 1867—1898 гг. им было сделано более 20 изобретений и опубликовано свыше 30 научных трудов, не считая статей и докладов на заседаниях научных обществ и во время публичных выступлений<sup>6</sup>.

О важности работ В.Н. Чиколева для электротехников нашего времени можно судить, в частности, по тому, что в 1949 г. были изданы его «Избранные труды по электротехнике, светотехнике и прожекторной технике».

В.Н. Чиколев возглавил огромную работу по подготовке первой в мире специальной электротехнической выставки в Москве в 1880 г. Ему и тесно сотрудничавшим с ним П.Н. Яблочкиву и А.Н. Лодыгину принадлежала идея созыва Первого съезда русских электротехников.

К сожалению, Владимиру Николаевичу не суждено было дожить до открытия электротехнического съезда. Он скончался 6(18) марта 1898 г. в расцвете творческих сил после длительной болезни, возникшей от удара при крушении дрезины, на которой он ехал для проведения экспериментов на артиллерийском полигоне. Гроб с телом выдающегося электротехника и общественного деятеля несли на руках до самого кладбища рабочие и сотрудники Охтенского и других военных заводов Петербурга.

### Основные труды В.Н. Чиколева

Избранные труды по электротехнике, светотехнике, прожекторной технике (Госэнергоиздат, 1949)

Руководство к приготовлению и сжиганию фейерверков (1867)

Осветительная способность прожекторов электрического света (1892—1895)

Применение электрического освещения для военных целей (1894)

Электрическое освещение в применении к жизни и военному искусству (1879, 1885)

Электрический свет в крепостной, осадной, береговой и полевой войне.

Лекции по электротехнике (1887)

<sup>6</sup> Весьма интересна в наши дни его заметка «Электричество и национализм», опубликованная в 1897 г. и воспроизведенная в журнале «Электричество» в 1992 г. (№ 5).

- Электрические аккумуляторы  
 Электрические единицы и измерения (1897)  
 Теория прожекторов (1892)  
 Не быть, но и не выдумка (1896)  
 Чудеса техники и электричества  
 Справочник для электротехников (1885, 1896)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перский К.Д. В.Н. Чиколев (некролог) — Артиллерийский журнал, 1898, № 6.  
 2. Владимир Николаевич Чиколев (некролог). — Электричество, 1899, № 11—12.

3. Белькинд Л.Д. Владимир Николаевич Чиколев. — Вестник Академии наук СССР, 1948, № 4.  
 4. Шателен М.А. Русские электротехники второй половины XIX в. — Госэнергоиздат, 1949.  
 5. Новиков В.В. Чиколев. Избранные труды. — Госэнергоиздат, 1949.  
 6. Шателен М.А. Русские электротехники XIX века. — Госэнергоиздат, 1955.  
 7. Белькинд Л.Д., Веселовский О.Н., Конфедератов И.Я., Шнейберг Я.А. История энергетической техники. — Госэнергоиздат, 1960.  
 8. Веселовский О.Н., Шнейберг Я.А. Энергетическая техника и ее развитие. — М.: Высшая школа, 1976.  
 9. Веселовский О.Н., Шнейберг Я.А. Очерки по истории электротехники. — М.: Изд-во МЭИ, 1993.

14 апреля с.г. в Институте истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова (ИИЕТ) прошла научная конференция, посвященная 250-летию со дня рождения Alessandro Volta.

Председатель заседания — заведующий сектором истории физики и механики ИИЕТ В.П. Визгин во вступительном слове сформулировал ряд нерешенных проблем в истории создания «вольтова столба». На конференции выступили О.Д. Симоненко (ИИЕТ) с докладом «Вольтов столб» и становление электротехники постоянного тока, В.П. Борисов (ИИЕТ) с докладом «Работы XVIII—XIX вв. по исследованию электротехнического разряда в вакууме», Я.А. Шнейберг (МЭИ) с докладом «Огромная наимаче батарея» академика В.В. Петрова и экспериментальное определение ее характеристики, Н.А. Григорян (ИИЕТ) дала оценку вклада Вольты в электрофизиологию, В.К. Жирбис рассказал о своих прецизионных опытах по изучению физического вакуума и оригинальных идеях по их истолкованию.

Три доклада, оформленные в виде статей для нашего журнала, публикуются ниже.

## Гальвани и Вольта: противостояние и общее свершение

ЛЕЖНЕВА О.А.

Главное дело жизни профессора физики Павийского университета Alessandro Вольты (1745—1827) — изобретение электрохимического генератора постоянного тока — неразрывно связано с именем профессора анатомии Болонского университета Луиджи Гальвани (1737—1798). Изобретение было сделано именно благодаря дискуссии между этими учеными, проходившей в 1792—1798 гг. и как бы завершившейся в 1880 г. победой Вольты уже после смерти Гальвани. Тот факт, что Павия, как и родина Вольты — Комо, относились к Австрийским владениям раздробленной в то время Италии, а Болонья — к Папской области, существенно сказалось на динамике дискуссии. В разгар полемики в Италию вторглись революционные войска генерала Бонапарта, нарушившие работу Вольты (Павия несколько раз переходила из рук в руки), прекратившие работу Гальвани, уволенного за отказ присягнуть Пизальпинской республике. Для него оккупация базожными французами была трагедией. Для Воль-

ты эти события означали лишь смену австрийского владычества французским; он входил в число представителей Павии на переговорах с Наполеоном и впоследствии был осыпан им почестями и наградами за свое великое изобретение. Контрастным было и психологическое состояние участников научного спора в личном плане: Гальвани тяжело переживал потерю в 1790 г. долго болевшей любимой жены Люции — участницы его опытов. Только желание защитить истину — существование электрофизиологических процессов — и помощь энергичного племянника физика Джованни Альдини стимулировали его продолжать спор. Вольта, напротив, был полон энтузиазма (вначале подтверждая, а затем опровергая результаты Гальвани), в 1794 г. он счастливо женился и к 1798 г. имел уже трех сыновей. При этом, несмотря на остроту противостояния, дискуссия велась исключительно корректно. Глубокое уважение, которое Вольта питал к Гальвани как к первоходицу, находило отражение

и после 1800 г. во время его триумфальных визитов в европейские научные центры. Термины, касающиеся явлений в цепи постоянного тока, оказались связанными с именем Гальвани: гальваническая батарея, гальванотехника.

Интерес врача и физиолога Гальвани к электричеству не был случайным. В 60—70-е годы XVIII в., когда начиналась его научная карьера, применение электростатических машин и лейденских банок в медицине было уже свершившимся, хотя и не вполне осмыслившимся фактом, естественным следствием открытия физиологической (мускульной) реакции человека на электрический разряд. В 1760 г. А. фон Галлер открыл сокращения мышц препарированной лягушки при сообщении ей электрического заряда. В поисках связи физиологических и электрических процессов ученые стали предполагать, что нервы окружены чем-то вроде электрической жидкости, которая распространяется с большой скоростью от мозга под действием воли и вызывает сокращение мускулов.

Другим стимулом интереса к электрофизиологии было изучение природы удара угря и ската, сходного с ударом от лейденской банки. Вопрос оставался спорным, пока Джон Уолли не доказал это сходство не физиологическими опущениями, а показаниями электрометра (1773) и не были получены искры от угря и ската (1776—1777).

Интерес Гальвани к электрофизиологическим явлениям был связан с изучением механизма мускульных движений и проявился еще в 1772 г., когда он сделал доклад об опытах Галлера. В дневнике 1780 г. зафиксированы его собственные опыты с машиной профессора Пизанского университета Рамсдена. В 1781 г. Ф. Фонтана (1730—1805) выдвинул экспериментальное объяснение вопроса о связи мускульного движения с электричеством в качестве первоочередной задачи.

Исследования Гальвани содержат три принципиально различных цикла опытов, два из которых описаны в его знаменитом «Трактате о силах электричества при мышечном движении» (1791), а третий был проведен уже в процессе дискуссии. Первичными были наблюдения двух ассистентов Гальвани: один заметил судорожное сокращение лапки свежепрепарированной лягушки при прикосновении к ее бедренному нерву скальпелем, другой (предполагают, что Лючия) заметил, что это происходит только в момент проскачивания искры в разряднике расположенной на том же столе электрической машины. В 1786 г. Гальвани наблюдал аналогичные явления при грозовых разрядах. Фактически контур «лапка—скальпель—экспериментатор» или «лапка—длинная металлическая проволока» («нервный проводник», по Гальвани) служил приемником затухающих электромагнитных волн искрового разряда, а лапка их детектором. Это было не-

осознанное предвосхищение открытия радио, что стало понятным только после открытия Фарадеем электромагнитной индукции, создания теории Максвелла и опытов Герца. Поскольку налицо был внешний источник электричества, эти опыты не имели прямого отношения к гипотезам об электричестве, присущим всему животному миру.

Явление, которое привело к созданию «вольтова столба», было замечено Гальвани во время опытов с атмосферным электричеством. Он обнаружил сокращения лапок, заготовленных для будущих опытов и подвешенных на крючках на железной решетке при ясном небе. Тогда он стал специально наблюдать поведение подвешенной лапки, но в течение нескольких дней никаких сокращений не обнаружил. Утомленный ожиданием, Гальвани изогнулся и плотно прижал к решетке крючок, пропущенный через спинной мозг лягушки «с целью заметить какие-либо сокращения при изменении случайных условий опыта». Наблюдавшиеся сокращения не были связаны с электрическим состоянием атмосферы.

Затем Гальвани повторил опыт с медным крючком и железной пластинкой в лаборатории и получил в разные часы дня в разных местах сокращения лапок, отметив, что содрогания были при одних металлах сильнее, чем при других. Тогда он стал применять вместо металлов стекло, смолу, резину, камень, дерево, и неожиданно для него явлений не было. Почему неожиданно? Гальвани достаточно хорошо знал физику, чтобы в соответствии с представлениями своей эпохи считать, что источником электричества служат изоляторы, а металлы — только его проводники. Именно отсутствие содроганий при контакте с изоляторами послужило толчком для предположения о том, что электричество находится внутри животного. Таким образом, составив замкнутую цепь из контактирующих металлов и нервно-мышечного препарата, Гальвани понял, что имеет дело с новым явлением и вполне логично увидел в нем предсказанное теоретической мыслью физиологов животное электричество. В то же время от отметил, что животное электричество имеет много общих свойств с обычным и с электричеством специфических рыб. «Сверхзадачей» Гальвани было доказать экспериментально существование животного электричества, чего он и достиг, но позже — в 1794 г.

В последней части «Трактата», которая называется «Некоторые предположения и заключения», изложена конкретная гипотеза о происхождении животного электричества и механизме мышечного движения.

Можно было бы на ней не останавливаться, тем более, что сам Гальвани готов был ее немедленно отбросить, если бы было доказано преимущество другой гипотезы. Но ее уязвимость дала пищу для первых критических атак Вольты,

сосредоточенных в дальнейшем на главном принципиальном вопросе о существовании или несуществовании животного электричества.

Коротко, согласно гипотезе Гальвани, источником животного электричества служит мозг, оно распространяется по первам, внутренняя часть которых проводящая, а внешняя, «масляная», — изолирующая. При этом в мышцах электричество может концентрироваться в течение длительного времени: мышечное волокно — лейденская банка, наружный заряд отрицательный, внутренний — положительный, мышца — батарея лейденских банок. Исходящие из мозга импульсы нарушают электрическое равновесие, и мышцы сокращаются, как и при действии внешнего источника электричества (происходит разряд между наружным и внутренним слоями мускула, который раздражает мускульные волокна, и они сокращаются).

«Трактат» Гальвани был опубликован в 1791 г. в «Комментариях» Болонской Академии наук и вызвал огромный интерес: в 1791—1793 гг. вышло пять латинских изданий, два итальянских и одно немецкое. Большинство просто с успехом повторяло опыты Гальвани и принимало с восторгом открытие животного электричества. Но Вольта быстро перешел от восторга к сомнениям. Почему они возникли именно у него? Напомним некоторые существенные обстоятельства жизни и деятельности Вольты до 1792 г.

Аlessandro Вольта родился и воспитывался в старинной дворянской семье ломбардского города Комо, расположенного вблизи швейцарской границы. Часть Ломбардии, где расположены Комо, Милан, Павия, с 1714 г. устойчиво находилась во владении австрийских Габсбургов. Отец Alessandro Филиппо Вольта, принадлежавший в течение 11 лет к ордену иезуитов, в 41 год женился. Две из четырех его дочерей стали монахинями, а три из пяти сыновей — священнослужителями. К моменту рождения младшего сына Alessandro, семья совершило разорилась, а через 7 лет Филиппо умер.

Развиваясь Alessandro необычно: в четыре года еще совершенно не умел говорить, а в школе проявил блестящие способности, что побудило родных и друзей оказать ему материальную поддержку для продолжения образования, которое первоначально было гуманитарным. Неудивительно поэтому, что интерес 18-летнего Вольты к физике и химии и, в особенности, к трудам Джозефа Пристли (1733—1804) выразился в форме длинной поэмы по образцу поэмы Лукреция Кара «О природе вещей». В том же году началась систематическая переписка Вольты с крупнейшим в то время итальянским исследователем в области электричества профессором Турийского университета Джамбатиста Беккариа (1710—1781) и другими физиками. Таким образом, к 18 годам Вольта, ознакомившись в проблемами физики и химии, самостоятельно, уверенно и решительно оп-

ределил свой жизненный путь и научные интересы.

Большую помощь в материальном обеспечении экспериментальных исследований оказал ему старший товарищ, имевший собственную лабораторию и научную библиотеку.

В 1769 г. появилась первая работа Вольты «О притягательной силе электрического огня», в которой, в частности, описаны опыты по электризации трением двух различных металлов. Это был вполне оригинальный опыт, так как в то время и еще в течение нескольких десятков лет подвергалась сомнению возможность электризовать металлы каким бы то ни было механическим способом. Считалось, что электризоваться могут «электрики» (диэлектрики), а неэлектрики (проводники), если они изолированы, могут быть заряжены лишь от постоянного источника. Именно здесь мы видим элемент индивидуальной творческой «парадигмы», в рамках которого определился подход Вольты к явлениям, открытым Гальвани. Из дальнейших широко известных открытий Вольты, совершенных до 1792 г., прямое отношение к дискуссии имело изобретение им на основе открытия Ф.У.Энинуса электрофера (1775), что открыло путь, с одной стороны, к конструированию машин нового типа для получения электричества и, с другой, к созданию самим Вольтой метода обнаружения малых зарядов (электроскоп с конденсатором). Электроизмерительные приборы предлагались ранее, но только Вольта ввел понятие напряжения и установил соотношение между емкостью проводника, зарядом и напряжением.

Трактат Гальвани попал в руки Вольты в конце марта 1792 г. 5 мая от выступил с большой речью, в которой признал открытие Гальвани существования электричества, свойственного всем холоднокровным и теплокровным животным, доказанным на основании многих хорошо задуманных и тщательно описанных опытов, хотя, по собственному признанию, приступал к их повторению с недоверием и предубеждением.

В следующей публикации в том же году Вольта, ссылаясь на самого Гальвани, пишет о необходимости применять два разных металла при опытах с животными в целом виде, но оговаривается, что это условие не является совершенно необходимым, если первы обнажены и изолированы. 28 июля 1792 г. в Модене вышло новое издание Трактата Гальвани и описание дополнительных опытов Альдини. В дальнейшем, признав Альдини за «секундanta», Вольта обращается к нему, а не к Гальвани. 24 ноября 1792 г. он адресует Альдини свою третью статью о животном электричестве, где описал новое открытие при применении двух металлов переход электрического флюида не является моментальным, каким был бы разряд, но постоянным и продолжающимся все время, пока сохраняется сообщение между обе-

ими обкладками и независимо от того, наложены ли эти обкладки на живое или мертвое вещество или на другие не металлические, но достаточно хорошие проводники, как, например, на воду или на смоченные ею тела. Но в то же время в письме в Англию к Кавалло от 3 сентября Вольта писал, что, повторив опыты с учетом этого своего нового открытия, он не убедился в том, что естественное животное или собственное органическое электричество не существует и что оно не может быть отброшено совершенно.

Полное отрицание существования животного электричества Вольта высказал в письме к А.М. Вассали от 10 февраля 1794 г., утверждая, что если Гальвани или другие будут настаивать на получении сокращений с применением обкладок из одного металла, то он скажет, что они различаются между собой либо по теплоте (скрытое предсказание эффекта Пельтье), либо по закалке, либо полировкой и блеском. И далее приводит дополнительный аргумент: прибегать к другому просто предполагаемому принципу, т. е. к естественному отсутствию равновесия электрического флюида в животных органах..., было бы бесполезным умножением причин, вызывающих эффекты одной и той же природы. Такая постановка вопроса Вольтой была бы в данном случае правильна, если бы он отстаивал единство природы электричества разного происхождения, но он говорил об общности механизма его получения в процессах живого и неорганического миров, т. е. проявил односторонний подход, легко объясненный особенностями характера. Увлекшись борьбой, он хотел полной и безоговорочной победы. Гальвани не хотел борьбы, но не хотел и предания истины. Поэтому он публикует анонимно небольшое сочинение «об употреблении и о значении проводящей дуги при мышечных сокращениях» (Модена, 1794) с добавлением описания опытов получения сокращений мышц в контуре, состоящем из мышц и нервов без всяких металлов. Аналогичные результаты получил также Э. Валли.

В процессе полемики Вольта каждый новый опыт сторонников животного электричества толковал в свою пользу, но при этом раз и раз с вою теорию. Сначала, как уже упоминалось, ему пришлось признать, что неизбежно нужны два разных металла, достаточно неоднородности в структуре одного и того же металла. Это еще давало возможность ввести термин металлическое электричество вместо животное электричество. После опубликования анонимного трактата ему пришлось признать (в третьем письме к Вассали от 7 октября 1795 г.), что и контакты влажных неметаллических проводников между собой могут давать электричество.

Между тем, как признал и сам Вольта, анонимный трактат склонил чашу весов в пользу Гальвани. Гальвани умолк, Вольта же продолжал

активно работать — субъективно над опровержением существования животного электричества, объективно над созданием электрохимического источника постоянного тока. Важным этапом считалось прямое обнаружение им с помощью дупликатора Никольсона контактного электричества (1796), позволившее ему обосновать существование «ряда напряжений», но, как заметил М. Лауз, Вольта фактически измерял напряжение на полюсах открытого гальванического элемента, так как между металлическими пластинками всегда имеется водяная прослойка.

Дискуссия продолжалась, но Гальвани уже не имел лаборатории. Последний его шаг — письмо к аббату Ладзаро Спалланцани как к высоко-авторитетному ученому и коллеге Вольты (1797).

Реакция Вольты — анонимное письмо к Альдини (апрель 1798 г.), которое начинается с похвалы Гальвани за его открытие. Затем он в третьем лице излагает опыты и аргументы своего «соотечественника Вольты» и спрашивает, искренне ли верил Альдини, что животное электричество в истинном смысле происходит от деятельности органов в результате внутреннего действия жизненных сил, как это утверждает Гальвани и другие и как это подчеркнуто в последней работе 1797 г., а не искусственно, происходящее от контакта проводников, если они образуют круг, различаются между собой субстанционально или по другим обстоятельствам.

Дискуссия уже не нуждалась в экспериментах после того, как были получены сокращения и на чистых биопрепаратах, и в их отсутствие.

Физики, особенно английские, были на стороне Вольты, врачи физиологи поддерживали позиции Гальвани. Гальвани не дожил до мнимо «окончательной» победы Вольты, выразившейся в изобретении «вольтова столба», но непрерывные атаки и упорное отрицание очевидной для него и основанной на прямых экспериментах истины не могли не послужить существенным дополнением к превратностям личной судьбы и постигшим его родину потрясениям. Он был сломлен, болезнь не заставила себя ждать, и 4 декабря 1798 г. скончался.

По-видимому, единственным человеком, который своевременно разобрался в ситуации, был Александр Гумбольдт, которому в год появления Трактата Гальвани было 22 года. Повторив опыты обоих соперников, он понял, что Гальвани открыл как «животное», так и «металлическое» электричество, но его двухтомный труд по гальванизму появился только в 1797—1799 гг.

Как только на севере Италии стабилизировалась военно-политическая обстановка, Вольта возобновил свой опыт. Считая по-прежнему причиной появления «гальванического электричества» контакт разных металлов, он попытался увеличить напряжение последовательным соединением пар металлов, но оно оказалось тем же, что и при

одной паре. Проложив между каждой парой влажные прокладки, он добился цели, сконструировал вертикальную батарею («вольтов столб»), затем чашечный вариант батареи, но отводил жидкости чисто пассивную роль, оставаясь верным своей контактной теории. Этот концептуальный консерватизм не помешал практическому результату — созданию источника постоянного электрического тока.

В итоге, несмотря на различия в профессиональной подготовке, научных интересах, отправных позициях в споре, особенностях судьбы и психологии Гальвани и Вольта осуществили гран-

диозный научный синтез. Учение об электричестве совершило поворот от электростатики к электродинамике, была заложена основа электротехники. Немедленно после сообщения об изобретении Вольты в Англии расцвела электрохимия; электрофизиологические явления перестали считать прерогативой отдельных представителей морской фауны, был дан старт электрофизиологии с ее диагностическими и лечебными применениями в медицине. При этом сами герои — ни биолог, ни физик — не подозревали о роли химических процессов в изучавшихся явлениях.

## Проблема Вольты в электрохимии

СКУНДИН А.М.

Сразу же после создания В. Вольтой химического источника тока (гальванического элемента) ученых заинтересовал вопрос: за счет чего работает такой источник тока, иными словами, за счет чего создается ЭДС и где она локализована? Впоследствии оба эти вопроса получили название «проблема Вольты». Сам Вольта считал, что причиной ЭДС является контакт разнородных металлов; эта идея подтверждалась так называемым «основным опытом Вольты» и явилась основой «контактной» теории ЭДС. Основной опыт состоял в том, что при со-прикосновении двух различных металлов оба они оказывались заряженными (один — положительно, другой — отрицательно).

Дж. Фаброни сформулировал «химическую» теорию ЭДС, согласно которой причиной возникновения ЭДС, т. е. источником мощности гальванического элемента, являются протекающие в нем химические реакции. Впоследствии обе теории получили экспериментальное подтверждение и каждая приобрела многочисленных сторонников. Вопросом об источнике мощности гальванического элемента подробно занимался М. Фарадей, который пришел к выводу о справедливости именно химической теории.

После открытия закона сохранения энергии и создания химической термодинамики было твердо установлено, что при работе химического источника тока происходит превращение химической энергии токообразующих реакций в электрическую, и вопрос о причине возникновения ЭДС был решен окончательно. Однако вопрос

о локализации ЭДС в источниках тока оставался открытым. В теории электродных потенциалов В. Нернста (1889 г.) предполагалось, что скачки потенциалов, образующие ЭДС, находятся только на границах металл—раствор; граница двух разных металлов во внимание не принималась. Результат основного опыта Вольты считался артефактором, так как предполагалось, что на поверхностях контактирующих металлов были пленки влаги, играющие роль электролита. И. Лэнгмюр провел в 1914 г. опыт Вольты в условиях высокого вакуума, когда поверхности металлов были свободны от построенных пленок, и подтвердил результат Вольты.

Решение проблемы Вольты удалось найти в конце 20-х годов А.Н. Фрумкину, который развивая концепцию потенциалов нулевого заряда, экспериментально показал, что потенциалы нулевого заряда разных металлов различны (что противоречило теории Нернста). А.Н. Фрумкин пришел к выводу, что образующие ЭДС скачки потенциалов локализованы на всех межфазных границах в гальваническом элементе (границах металл—металл и металл—раствор). В специальных условиях, когда скачки потенциалов на границах металл—раствор отсутствуют, вся ЭДС локализована на границе металл—металл в соответствии с контактной теорией. Во всех остальных случаях распределение потенциалов между тремя межфазными границами неопределенно, но их сумма всегда соответствует значению, вычисленному из свободной энергии токообразующей реакции.

# Вольта, вольт и вольт-амперные характеристики элементов электрических цепей

НЕТУШИЛ А.В.

В последние годы в средствах массовой информации публикуется много религиозно-мистических сочинений о «жизни после смерти», и вопрос о бессмертии души обсуждается с самых различных, порой фантастических, позиций. Относясь скептически к этим публикациям, я посмотрел «Толковый словарь русского языка» под редакцией Д. Ушакова и среди иных нашел такое толкование слова «бессмертный» — это «член французской Академии» (ученый, внесший незабываемый вклад в науку).

В 1800 г. итальянский физик Alessandro Вольта во Французском национальном институте сделал доклад об источнике электрического тока, названного впоследствии «вольтовым столбом». Этот доклад можно считать исходным моментом в создании учения об электрическом токе. Ранее Вольта был избран членом-корреспондентом французской Академии и ему Наполеоном было присвоено звание бессмертного. Значительно позже (в 1814 г.) этого звания был удостоен французский физик Андре Мари Ампер. Вольта и Ампер заслуженно признаны основателями учения об электричестве.

Уже после их смерти, в 1861 г. на заседании Британской научной ассоциации и в 1881 г. на Международном конгрессе в Париже их именами были названы основные единицы измерения электрических напряжений и токов — вольт и ампер. Позже их имена вошли в названия некоторых электротехнических терминов, характеризующих различные явления и устройства. Перелистывая технические словари на различных языках, мы найдем более сорока терминов, содержащих имена Вольты и Ампера порознь или вместе.

В последние годы особое значение в теории электрических цепей приобретают зависимости между напряжением и током в статике и динамике, получившие наименование вольт-амперных характеристик, сокращенно ВАХ. Эта аббревиатура первоначально воспринималась как инженерный жаргон, и ее избегали применять в научно-технической литературе.

Говоря об электротехнических единицах измерения и, в частности о вольте, можно заметить, что в вольтах измеряются четыре физические

величины: напряжение, ЭДС электрический потенциал и скорость движения электрона (электрон-вольт). Это выделяет вольт из всех остальных единиц измерения как рекордную.

Особо следует сказать о понятии вольт-амперная характеристика, которое за 200 лет претерпело существенные изменения. Что же касается открытых Вольтой гальваническом элементе и вольтовой дуге, то оба эти элемента электрических цепей начали описываться вольт-амперными характеристиками только через много лет после их открытия. Первоначально можно было говорить только о внешних характеристиках батареи при ее нагрузке, которая изображалась прямой линией, выражающей так называемый обобщенный закон Ома.

О законе Ома следует сказать отдельно. В отличие от Ампера и Вольты Георг Ом не попал в число «бессмертных», так как не был избран во французскую Академию. В 1827 г. он послал свою знаменитую книгу «Гальваническая цепь в математическом описании» действительному члену Академии математику Ж. Фурье и не получил от него поддержки.

В кругах «педагогической администрации» принято считать, что знать электротехнику — это знать закон Ома. Однако развитие теории нелинейных цепей опровергает это утверждение. Первые исследования вольтовой дуги приводят к получению нелинейных зависимостей тока от напряжения и не соответствуют закону Ома. Наибольшую известность получила нелинейная статическая характеристика дуги, описанная Герцой Айртон уравнением гиперболы. Эта характеристика имеет отрицательный наклон и относится к типу S. При переменных токах получаются еще более сложные неоднозначные динамические характеристики. В этих случаях необходимо исследовать вольт-амперные характеристики, зависящие от времени и температуры дуги. Они рассматриваются в многомерном пространстве и являются предметом теории нелинейных цепей, получившей развитие уже в нашем веке на основе некоторых идей бессмертных ученых XIX и начала XX веков.

## В Академии электротехнических наук

В Ярославле на базе АО «Ярославский электромашиностроительный завод (ЯЭМЗ) 6–8 июня с.г. состоялось расширенное выездное заседание бюро отделения «Электромеханика и силовая преобразовательная техника в промышленности» Академии электротехнических наук РФ. Заседание рассмотрело состояние и перспективы развития электромашиностроения в стране, обсудило приоритетные направления развития отрасли, фундаментальных и прикладных исследований, роль и формы участия в этом Академии.

Участвовало 14 представителей научно-технических ассоциаций, производственных объединений, отраслевых НИИ и заводов, вузов и редакции журнала «Электричество».

Совещание отметило, что в условиях экономического кризиса, сопровождающего формирование рыночной экономики, в электротехнической промышленности и в ее важнейшей подотрасли — электромашиностроении — наиболее заметен спад производства. Его подъему, снижению затрат и введению новых технологий препятствуют резкое увеличение цен на материалы и существующая налоговая политика. За пределами России оказалась значительная часть производственных мощностей, бывших монополистами по выпуску отдельных типов электрических машин или отрезков единых серий. Электромашиностроители России стремятся восполнить эти потери, осваивая производство новых для них типов и габаритов машин. Показателен в этом смысле опыт Ярославского электромашиностроительного завода<sup>1</sup>, который:

осваивает производство новых для него типоразмеров асинхронных двигателей серий 4А и АИ;

разрабатывает и наращивает выпуск перспективной серии асинхронных двигателей;

активно выходит на внешний рынок, экспортируя примерно 18% годовой продукции, а также узлов и деталей электрических машин. Большинство показателей электродвигателей, выпускаемых заводом, близко или полностью отвечает международным стандартам, что облегчает их продвижение на внешний рынок;

стремится к выпуску новой продукции, отвечающей запросам потребителя, разрабатывает конструктивные и технологические усовершенствования;

<sup>1</sup> Статья на данную тему публикуется в этом номере (см. с. 36).

сотрудничает с научными лабораториями и кафедрами вузов, целенаправленно финансируя перспективные идеи и разработки.

Все это позволило ЯЭМЗ поддерживать достаточно высокий уровень выпуска продукции, расширять ее номенклатуру, сохранить основные кадры специалистов и квалифицированных рабочих и регулярно выплачивать им заработную плату.

Сейчас каждое предприятие вносит что-то свое в выпускаемые электрические машины, и рынок должен определить их конкурентоспособность по таким показателям, как себестоимость, потребительские свойства, надежность. А в России сейчас немало платежеспособных потребителей электротехнических изделий и потребность в них очень велика.

Участники совещания пришли к выводу, что стандартные электродвигатели мощностью до 100 кВт будут занимать все более скромное место в общем парке электрических машин, а специализированные исполнения и модификации станут основными. Необходимо расширить выпуск регулируемых асинхронных двигателей, в том числе в малых диапазонах, и поставлять потребителям готовые комплексы, включающие пусковую, регулирующую, контрольно-измерительную и защитную аппаратуру. Последнее потребует средств для расширения производства элементной базы преобразователей, электрических и электронных аппаратов. Комплектное электротехническое оборудование должно, как правило, разрабатываться и поставляться целевым образом, например, вентиляционное, насосное для водоснабжения и нефтяной промышленности и т. п. Прогрессивным является также создание электродвигателей конструктивно интегрированных с производственными механизмами и машинами.

Среди важнейших задач сегодняшнего дня совещание отметило:

продолжение исследований в области энергосберегающих конструкций и технологий;

разработку оборудования для массового регулируемого электропривода переменного тока;

создание мощных регулируемых двигателей переменного тока и преобразователей для управления ими;

ускорение развития бытовой электротехники, в том числе электромеханических машин и приборов;

инициирование исследований возможностей использования электромеханических преобразователей в медицине и биологии;

приведение отечественных стандартов на электрические машины в соответствие с международными;

создание банка данных об электрических машинах, производимых в стране предприятиями всех форм собственности, который должен быть максимально доступным для заинтересованных организаций и лиц;

участие Академии (совместно с вузами) в подготовке, переподготовке и повышении квалификации электротехнических специалистов различных уровней.

Совещание обратило внимание на серьезное отставание отечественного машиностроения в разработках и выпуске машин малой мощности различных типов и назначений. Эта массовая продукция в особенности требует владения передовыми технологиями. Выпуск микромашин, разработка которых требует применения передовых технологий, можно было бы наладить на заводах Минавтосельхозмаша, имеющих свободные мощности, а на оборонных предприятиях по программам конверсии. Потребителям требуются асинхронные и коллекторные двигатели для бытовой техники, радио и медицинской аппаратуры, игрушек. Находят сбыт синхронные двигатели малой мощности с постоянными магнитами и реактивные вентильные, коллекторные машины переменного тока, асинхронные регулируемые и др.

Актуальным и приоритетным направлением на совещании было признано создание машинных генераторов электроэнергии для установок, использующих нетрадиционные ее источники: ветер, малые реки, морские приливы и др. Уже существуют государственные программы развития малой энергетики, необходимо расширить их географические рамки. Выпуск широкой номенклатуры генераторных установок будет способствовать электрификации отдаленных населенных пунктов. Следует также восстановить законсервированные и разрушенные малые ГЭС.

Решение этих и других комплексных задач поможет восстановить международное сотрудничество предприятий в рамках СНГ, установить более широкие связи с целью координации работ и кооперации при их выполнении. Конкретные направления развития отрасли сделают более вероятной финансовую поддержку Государственного бюджета. Для координации конкретных работ имеет смысл создать специальные структурные подразделения — инженерные центры.

Бюро отделения считает, что основной задачей Академии электротехнических наук Российской Федерации является формирование и проведение технической политики в области электротехники, определение направлений научных исследований и прикладных разработок. Академия должна выходить в государственные органы с законодательной инициативой о развитии отрасли, о целесообразных бюджетах ассигнования, работать с ведомствами. Важна роль Академии и в проведении экспертизы оригинальных идей и предложений по производству новой продукции.

Практическое взаимодействие Академии с предприятиями электротехнической промышленности будет осуществляться в трех основных направлениях:

развитие теории, проведение фундаментальных исследований;

разработка концепции, рекомендаций по приоритетным направлениям развития и содержанию государственных программ;

поддержка прикладных исследований, содействие внедрению в производство новых изделий и расширению рынка сбыта.

Совещание считает важным проведение организационной работы по созданию и юридическому оформлению регионального отделения Академии на базе электротехнических предприятий, организаций и вузов Ярославской, Ивановской, Костромской и Нижегородской областей.

Беспалов В.Я., доктор техн. наук

## К сведению авторов и читателей!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала (Б. Черкасский пер., 2/10, тел. 924-24-80).

# Николай Иосифович Зеленохат

(К 60-летию со дня рождения)

Николай Иосифович Зеленохат, доктор технических наук, профессор Московского энергетического института, окончил гидротехнический факультет Ленинградского политехнического института (Санкт-Петербургского государственного технического университета) в 1960 г. и начал свою трудовую деятельность в качестве дежурного инженера Туломской ГЭС, а затем — дежурного диспетчера РУ «Колэнерго».

В 1964 г. поступил в аспирантуру МЭИ по кафедре «Электроэнергетические системы». С 1968 по 1971 г. работал в Смоленском филиале МЭИ ассистентом и старшим преподавателем. С 1971 г. по настоящее время — сотрудник кафедры электроэнергетических систем МЭИ, на которой последовательно занимал должности старшего научного сотрудника, доцента, профессора.

В 1969 г. защитил кандидатскую, в 1990 г. — докторскую диссертации.

Н.И. Зеленохат — высоко-



квалифицированный специалист в области управления режимами электроэнергетических систем. Разработанные им основы теории гибких межсистемных связей, методы формирования алгоритмов управления и методики исследования режимов электроэнергетических систем хорошо известны научной общественности и положительно оцениваются.

Н.И. Зеленохат ярко зареко-

мендовал себя как педагог и наставник молодежи. Под его руководством защитили диссертации 19 аспирантов, в том числе 10 иностранных. Постоянно участвуя в научных исследованиях, он много времени уделяет и учебно-методической работе. Является соавтором учебного пособия «Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях», выпущенного «Энергоатомиздатом», автором нескольких учебных пособий, изданных в МЭИ, автором и соавтором около 150 печатных научных работ, среди которых 12 авторских свидетельств, 14 зарубежных публикаций. Им разработаны и прочитаны студентам новые курсы лекций: «Теория управления энергетическими объектами», «Теория управления переходными режимами».

Желаем Николаю Иосифовичу крепкого здоровья и больших успехов в научной и педагогической деятельности.

Группа товарищей



**Вниманию директоров предприятий всех форм собственности, руководителей маркетинговых и рекламных служб!**

**УВАЖАЕМЫЕ ГОСПОДА!**

**АО «СТАНДАРТЭЛЕКТРО»,  
официальный коллективный организатор экспозиции СНГ  
на международных электротехнических выставках,**

**ПРИГЛАШАЕТ ВАС**

принять участие в 6-й международной выставке «ЭЛЕКТРО-96», которая состоится в Москве в Выставочном комплексе на Красной Пресне со 2 по 6 июля 1996 г.

Справки об условиях участия и тематике выставки:

123807, Россия, Москва, Б. Грузинская, 12/ТК 428

Телефоны: (095) 254-18-14, 252-63-37

Факс (095) 254-05-63/для ТК 428

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### Секция теоретических основ электротехники, преобразовательной техники, электротехнических материалов

Лабунцов В.А., главный редактор, председатель секции (Московский энергетический институт), Бутырин П.А. (Институт высоких температур Российской Академии наук, Москва), Иоссель Ю.Я. (Научно-исследовательский институт постоянного тока, Санкт-Петербург), Комельков В.С. (Научно-исследовательский энергетический институт, Москва), Нетушил А.В. (Московская государственная академия тонкой химической технологии), Розанов Ю.К. (Московский энергетический институт), Пищиков В.И. (Московский энергетический институт), Тареев Б.М. (Всероссийский институт научной и технической информации, Москва), Толстов Ю.Г. (Научно-исследовательский энергетический институт, Москва), Чечурин В.Л. (Санкт-Петербургский государственный технический университет).

Научный редактор — Макаршин Б.Д.

### Секция электроэнергетики

Мамиконянц Л.Г., председатель секции (Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики, Москва), Гельфанд Я.С. (Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики, Москва), Ершевич В.В. (Проектный и научно-исследовательский институт «Энергосетьпроект», Москва), Митюшкин К.Г. (Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики, Москва), Морозкин В.П. (Московский энергетический институт), Семенов В.А. (Центральное диспетчерское управление Единой энергетической системы России), Стров В.А. (Московский энергетический институт).

Научный редактор — Кудинова Л.С.

### Секция техники высоких напряжений, электрических аппаратов, трансформаторов

Ларинов В.П., председатель секции (Московский энергетический институт), Белкин Г.С. (Всероссийский электротехнический институт, Москва), Бортник И.М. (Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, Москва), Костенко М.В. (Санкт-Петербургский государственный технический университет), Лизунов С.Д. (Московский электрозвод).

Научный редактор — Кудинова Л.С.

### Секция электрических машин

Иванов-Смоленский А.В., председатель секции (Московский энергетический институт), Данилевич Я.Б. (Отдел (институт) электроэнергетических проблем РАН, Санкт-Петербург), Евсеев Б.Н., заместитель главного редактора журнала, Шакарян Ю.Г. (Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики, Москва).

Научный редактор — Евсеев Б.Н.

### Секция электропривода и автоматизации технологических процессов

Слежановский О.В., председатель секции (Всероссийский научно-исследовательский институт «Электропривод», Москва), Андерс В.И. (Московский энергетический институт), Борцов Ю.А. (Санкт-Петербургский электротехнический университет), Ильинский Н.Ф. (Московский энергетический институт), Шаталов А.С. (Научно-техническое объединение «Антей», Москва).

Научный редактор — Евсеев Б.Н.