# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

5
МАЙ
1996

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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


## СОДЕРЖАНИЕ


**Агеева Е.В., Ершевич В.В.** Производство и экспорт электроэнергии в мире в 1993 г. . . . . 2

**Якимец И.В.,Винокуров В.А., Наровлянский В.Г.** Магнитный подвес на основе высокотемпературных сверхпроводников для транспортных систем . . . 7

**Зеленохат Н.И., Баргути Х.С., Левченко С.А.** Оценка колебательности электромеханического переходного процесса в электроэнергетической системе . . . . 13

**Кузнецов Н.Д., Кузнецов В.Н.** Экономичное распределение мощности между электростанциями энергосистемы . . . . . 19

**Алексеев В.Г., Левиуш А.И.** Влияние емкостной проводимости нулевой последовательности длинных линий на работу высокочастотных и дифференциальных защит . . . . . 25

**Милых В.И.** Исследование магнитного поля и электродинамических параметров линейного электродвигателя с большим зазором . . . . . 27

**Никаноров В.Б., Останин С.Ю., Шмелева Г.А.** Модель гистерезисного электродвигателя при несинусоидальном и несимметричном питании . . . . . 36

**Водовозов В.М., Водовозова Е.В., Цветиков Е.А.** Объектно-ориентированный подход к проектированию электромеханических систем . . . . . 41

**Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д., Тюков В.А.** О совместимости преобразователя и двигателя в асинхронном электроприводе . . . . . 47

**Белоусенко И.В.** Взрывобезопасность объектов газовой промышленности с электротехническими устройствами . . . . . 52

**Вишневский А.И., Лановок А.Я.** Расчет электрического поля в тонких проводящих слоях . . . . . 56

**Джендубаев А.-З.Р.** Асинхронный сварочный генератор 60

**Шляхтенко П.Г.** Новый метод и устройства для контроля электрических свойств порошковых квазидиэлектрических структур . . . . . 64

**Месенжник Я.З., Тареев Б.М., Прут Л.Я.** О достоверности оценки надежности электрической изоляции установок электроцентробежных насосов . . . . . 69

**Пятин Ю.М.** О дешифраторном методе анализа электрических цепей . . . . . 73


### ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА


**Лычкина Г.П.** О представлении трансформатора как четырехполюсника . . . . . 76


### ХРОНИКА


**Изяслав Борисович Пешков** (К 60-летию со дня рождения) 78

**Памяти Георгия Константиновича Жерве** 79


## CONTENTS


**Ageyeva Ye.V., Ershevitch V.V.** Electrical Power production and Export in the World . . . . . 2

**Yakimets I.V., Vinokurov V.G., Narovlyanskii V.G.** Magnetic Suspension on Basis of High-Temperature Superconductors for Transport Systems . . . . . 7

**Zelenokhat N.I., Bargouty K.S., Levchenko C.A.** Estimation of Oscillations under Electromechanical Transient Conditions in Large Electrical Power Systems . . . 13

**Kuznetsov N.D., Kuznetsov V.N.** Economic Power Distribution between the Electric Power Plants of the Electrical Power System . . . . . 19

**Alekseyev V.G., Leviush A.I.** Influence of a Zero Sequence Capacitive Susceptance of Long Overhead Lines on Currier Current and Differential Protection Functioning 25

**Milykh V.I.** The Research of the Magnetic Field and Electrodynamic Parameters of the Linear Electric Motor with Large Gap . . . . . 27

**Nikanorov V.V., Ostanin S.Yu., Shmelyova G.A.** The Circuit Model of Hysteresis Motor under Conditions of Non-Sinusoidal and Non-Symmetrical Power Supply . . . 36

**Vodovozov V.M., Vodovozova E.V., Tsvetikov E.A.** The Object-Oriented Approach to Electromechanical Systems Design 41

**Malinin L.I., Malinin V.I., Makelskii V.D., Tyukov V.A.** Certain Approach to the Compability a Converter and a Motor in the Asynchronous Drive . . . . . 47

**Belousenko I.V.** Explosion-Proof of Gas Supply Objects with Electrical Equipment . . . . . 52

**Vishnevskii A.M., Lapovok A.Ya.** Calculation of Electric Field in the Conducting Layers . . . . . 56

**Dzhendubayev A.-Z.R.** Asynchronous Welding Generator 60

**Shlyakhtenko P.G.** A New Method and Device for Controlling the Electric Properties of Powder Quasi-Electric Structure . . . . . 64

**Mesenzhnik Ya.Z., Tareyev B.M., Prut L.Ya.** Reliability Valnation of Electrical Insulation in Submersible Installations of Electrically Driven Centrifugal Oil Pumps 69

**Pyatin Yu.M.** Decoder Method for Electrical Circuit Alalysis 73


### NOTES and LETTERS


**Lychkina G.P.** A Transformer as a Two-Port . . . . 76


### CHRONICLE


**Izyaslav Borisovich Peshkov** (to Mark the 60th Anniversary) 78

**In Memory Georgii Konstantinovich Zherve** . . . . . 79



© «Электричество», 1996

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# Производство и экспорт электроэнергии в мире

АГЕЕВА Е.В., ЕРШЕВИЧ В.В.

*Приведены данные о производстве электроэнергии в мире в целом и по регионам, сведения о структуре производства за 1993 г., и сведения об экспорте и импорте электроэнергии.*

Ключевые слова: *электроэнергия, структура производства, экспорт, анализ*

*The paper cites the electrical power production data in the world and in regions, the electrical power production pattern for the year of 1993.*

Key words: *electrical power production, structure of production, export, analysis*

Единая энергетическая система России, включая ОЭС Дальнего Востока, уже сегодня имеет очень большое количество электрических связей с энергосистемами других стран. Наиболее значительны в техническом и коммерческом смысле связи с такими бывшими республиками СССР, как Украина, Беларусь, страны Балтии и Казахстан, а также со странами Северной и Восточной Европы, хотя использование связей с Восточной Европой почти на порядок ниже созданных ранее технических возможностей экспорта и обмена электроэнергией.

Многие страны, как непосредственно примыкающие к границам России, так и более удаленные, имеют основания рассчитывать на эффективность экспорта электроэнергии из России и на взаимовыгодный обмен с Россией мощностью и электроэнергией. К ним относятся: страны Балтии, Беларусь, Украина, ряд стран Восточной, Западной и Северной Европы, Молдавия, Закавказье, Турция и ряд стран Южной Европы, Казахстан, бывшие среднеазиатские республики СССР, Иран и другие страны Центральной Азии, Китай и Япония.

В рамках изучения перспектив строительства железной дороги Россия—США с тоннелем под Беринговым проливом, изучаются и перспективы создания мощной электрической связи по этому направлению.

Надежда на эффективность создания электрических связей этих стран с Россией основана на богатых Российских энергетических и экологических ресурсах, недорогих трудовых ресурсах, потенциальных возможностях достаточно быстрого ввода новых электрических мощностей, наличии мощных энергосистем с отличающимися от других стран условиями работы, что создает предпосылки для взаимовыгодного обмена мощностью и электроэнергией.

В этом свете и, особенно, имея ввиду перспективную роль ЕЭС России в формировании Глобальной электроэнергетической системы как центрального звена Евро-Азиатской ЕЭЭС [1], представляет интерес анализ фактического положения в мире с экспортом—импортом электроэнергии. Результаты этого анализа проводятся далее на основе статистических данных ООН за 1993 г. [2]. Материалы по собственно экспорту—импорту электроэнергии предваряются краткой характеристикой фактических уровней и темпов роста производства электроэнергии в мире, его регионах и отдельных странах на основе тех же исходных данных.

**Производство электроэнергии в 1993 г.** В мире в 1993 г. было произведено 12,3 трлн кВт·ч [2]. Рост производства по сравнению с 1992 г. составил около 1% — известный спад производства на территории бывшего СССР компенсировался быстрым ростом в других регионах мира, прежде всего в Азии.

Уровни производства электроэнергии в регионах мира в 1992 и 1993 гг., его структура

*Таблица 1*

| Регион мира | Уровни и структура производства электроэнергии, млрд кВт·ч/% | | | | | | | | Прирост за 1993 г., % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1992 г. | | | | 1993 г. | | | | |
| | Всего | ТЭС | ГЭС | АЭС | Всего | ТЭС | ГЭС | АЭС | |
| Мир | 12130/100 | 7754,5/63,9 | 2247,7/18,6 | 2127,8/17,5 | 12260,7/100 | 7717,1/62,9 | 2376,1/19,4 | 2167,5/17,7 | 1,1 |
| Африка | 330,0/100 | 268,8/81,5 | 51,9/15,7 | 9,3/2,8 | 339,6/100 | 281,9/83,0 | 50,5/14,9 | 7,2/2,1 | 2,9 |
| Азия | 3109,4/100 | 2312,2/74,4 | 475,9/15,3 | 321,3/10,3 | 3290,1/100 | 2412,5/73,3 | 526,1/16,0 | 351,5/10,7 | 5,8 |
| Европа | 4219,3/100 | 2439,6/57,8 | 694,7/16,5 | 1085,0/25,7 | 4042,2/100 | 2242,9/55,5 | 708,7/17,5 | 1090,6/27,0 | -4,2 |
| Северная Америка | 3788,5/100 | 2479,1/65,4 | 606,1/16,0 | 703,3/18,6 | 3873,0/100 | 2521,8/65,1 | 64[illegible]/16,6 | 716,0/18,3 | 2,2 |
| Южная Америка | 486,7/100 | 96,4/19,8 | 381,4/78,4 | 8,9/1,8 | 516,0/100 | 97,3/18,8 | 410,5/79,6 | 8,2/1,6 | 6,0 |
| Океания | 196,1/100 | 158,4/80,8 | 37,7/19,2 | — | 199,8/100 | 160,7/80,4 | 39,1/19,6 | — | 1,9 |

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

*Таблица 2*

| Страна | Производство электроэнергии по годам, млрд кВт·ч | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1990 | 1991 | | | 1992 | | | 1993 | | |
| | Всего | Всего | Абсолютный прирост | % к предыдущему году | Всего | Абсолютный прирост | % к предыдущему году | Всего | Абсолютный прирост | % к предыдущему году |
| Болгария | 42,1 | 38,9 | -3,2 | 92,4 | 35,6 | -3,3 | 91,5 | 38,0 | 2,4 | 106,7 |
| Чехия и Словакия | 86,6 | 83,2 | -3,4 | 96,1 | 81,8 | -1,4 | 98,3 | 82,8 | 1,0 | 101,2 |
| Венгрия | 28,4 | 30,0 | 1,6 | 105,6 | 31,6 | 1,6 | 105,3 | 32,8 | 1,2 | 103,8 |
| Польша | 136,3 | 134,7 | -1,6 | 98,8 | 132,8 | -1,9 | 98,6 | 133,9 | 1,1 | 100,8 |
| Румыния | 643 | 56,9 | -7,4 | 88,5 | 54,2 | -2,7 | 95,3 | 55,5 | 1,3 | 102,4 |

и годовые приросты по регионам показаны в табл. 1.

Как видно из табл. 1, структура производства электроэнергии за 1993 г. существенно не изменилась. По-видимому, можно отметить лишь две детали — производство электроэнергии на АЭС выросло по сравнению с 1992 г. еще примерно на 2%, началась реализация атомной программы в Китае. Следует подчеркнуть, что приведенная региональная структура производства электроэнергии соответствует новой политической ситуации — данные по России включены в Европу, а остальные республики бывшего СССР распределены между Европой и Азией соответственно их географическому расположению.

Не следует удивляться некоторому различию отчетных цифр, приводимых в статье и приведенных ранее [3] — ежегодно издаваемые статистические данные ООН, как правило, уточняют изданные в предыдущем году.

Несколько неожиданно снижение в 1993 г. производства электроэнергии по Европе в целом — около 4%. Возможное объяснение этому — уменьшение производства электроэнергии в 1993 г. не только в России, но и в Германии (видимо, частично за счет внутриполитических процессов после присоединения бывшей ГДР), и во Франции (около 4%).

Надо еще раз обратить внимание на продолжающийся очень быстрый рост производства электроэнергии в Азии — около 6% за 1993 г. Такие же темпы роста имели место и в Южной Америке, но при существенно меньших абсолютных объемах производства.

В 1993 г. продолжалось снижение производства электроэнергии на территории бывшего СССР, в целом оно составило около 6%, однако в отдельных странах это снижение было незначительным и даже имели место подъемы, например в Таджикистане (хотя это было на ГЭС и не отражает каких-либо общих тенденций) и небольшой — в Латвии. Окончательные суждения по идущему здесь процессу требуют статистических данных еще за 2—3 года, поскольку по предварительным данным в 1994 г. спад производства электроэнергии на территории бывшего СССР продолжался и только в 1995 г. проявились признаки переломных моментов — например, в России в 1995 г. уменьшение производства составило около 2% против 5—6% в предыдущие годы.

С точки зрения электроэнергетики можно считать, что внутренние политико-экономические переходные процессы в странах Восточной Европы закончились (или заканчиваются). Во многих странах этого региона и по региону в целом в 1993 г. производство электроэнергии увеличилось после длительного периода спада производства (табл. 2).

Очень высокие устойчивые темпы роста производства электроэнергии характерны для целого ряда стран Азии: Саудовской Аравии, Малайзии, Китая, Таиланда, Вьетнама, Южной Кореи, Турции и Индии. В табл. 3 приведены данные по странам, проводящим около 20 млрд кВт·ч в год и более и увеличившим производство электроэнергии в 1993 г. более чем на 5%.

Продолжает удивлять мир электроэнергетика Китая[1] — за 1993 г. производство электроэнергии в этой стране выросло примерно на 11%. Впечатляет и абсолютное значение прироста производства электроэнергии за 1993 г. — 85 млрд. кВт·ч. Некоторые данные о динамике производства электроэнергии в Китае, а для сравнения — также в Японии, США и в мире в целом даны в табл. 4. Анализ данных табл. 4 показывает, что и в 1993 г. в Китае продолжался быстрый рост производства электроэнергии — быстрее, чем в Японии и США не только по относительным (в процентах), но и абсолютным показателям. По предварительным данным в 1994 г. в Китае

1 Отчетные данные ООН не включают цифры по производству электроэнергии на Тайване.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

*Таблица 3*

| Страна | Прирост производства, % | | | Производство в 1993 г., млрд кВт·ч |
|---|---|---|---|---|
| | 1991 | 1992 | 1993 | |
| **Африка** | | | | |
| Алжир | 7,5 | 5,8 | 6,0 | 19,4 |
| Египет | 12,9 | 1,3 | 5,3 | 47,5 |
| **Азия** | | | | |
| Саудовская Аравия | 9,9 | 8,4 | 13,8 | 63,3 |
| Малайзия | 11,9 | 12,7 | 11,6 | 35,6 |
| Китай | 9,1 | 11,3 | 11,3 | 839,5 |
| Таиланд | 13,6 | 13,7 | 11,1 | 66,3 |
| Южная Корея | 11,4 | 11,8 | 10,6 | 163,4 |
| Турция | 4,9 | 11,6 | 9,7 | 73,8 |
| Сингапур | 6,4 | 5,4 | 8,6 | 19,0 |
| Индонезия | 5,3 | 6,6 | 7,3 | 58,9 |
| Индия | 9,1 | 5,4 | 7,2 | 356,5 |
| Пакистан | 7,7 | 9,9 | 6,3 | 55,3 |
| Израиль | 2,9 | 14,9 | 5,3 | 26,0 |
| Иран | 8,5 | 7,0 | 5,0 | 72,0 |
| **Европа** | | | | |
| Дания | 40,7* | -15,2 | 9,4 | 33,7 |
| Болгария | -7,6 | -8,5 | 6,7 | 38,0 |
| Финляндия | 6,6 | -0,5 | 6,1 | 61,2 |
| **Южная Америка** | | | | |
| Парагвай | 8,1 | -7,8 | 16,2 | 31,4 |
| Аргентина | 6,1 | 4,3 | 11,9 | 63,0 |
| Колумбия | 0,8 | 0,8 | 11,9 | 40,3 |
| Чили | 8,7 | 12,0 | 7,1 | 24,0 |

* за счет компенсации маловодья в Норвегии.

*Таблица 4*

| Страна | Производство электроэнергии: абсолютное (млрд кВт·ч) и ее прирост (млрд кВт·ч/%) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1988 | 1989 | | 1990 | | 1991 | | 1992 | | 1993 | |
| Китай | 545 | 585 | 40/7,3 | 621 | 36/6,1 | 678 | 57/9,2 | 754 | 76/11,2 | 840 | 86/11,4 |
| Япония | 754 | 799 | 45/6,0 | 857 | 58/7,3 | 888 | 31/3,6 | 895 | 7/0,8 | 907 | 12/1,3 |
| США | 2879 | 2960 | 81/2,8 | 3012 | 52/1,8 | 3058 | 46/1,5 | 3075 | 17/0,6 | 3146 | 71/2,3 |
| Мир в целом | 11117 | 11483 | 366/3,3 | 11789 | 306/2,7 | 12013 | 224/1,9 | 12130 | 117/1,0 | 12261 | 131/1,1 |

было произведено примерно 920 млрд. кВт·ч. Все приведенные цифры означают, что, по всей видимости, в 1995 г. Китай вышел на 2-е место в мире по производству электроэнергии (после США).

**Экспорт—импорт электроэнергии в 1993 г.** Фактические данные по экспорту—импорту в 1993 г. стран мира, производящих более 7 млрд. кВт·ч в год, приведены в табл. 5.

Естественно, что наибольший интерес представляют большие относительные значения экспорта и импорта электроэнергии — в % собственного производства. Однако пестрота приведенных показателей не позволяет сразу высказывать какие-либо устойчивые суждения по этому вопросу, тем более на основе данных только по одному году. Однако некоторые принципиальные выводы могут быть сделаны для трех типичных групп стран.

Во-первых, в ряде случаев большие цифры экспорта и импорта электроэнергии близки друг к другу, что означает использование основной сети данной страны для транзита электроэнергии. При этом сальдо внешних перетоков может быть отрицательным (Казахстан: экспорт — 60%, импорт — 84%, сальдо — 15%), положительным (Литва: экспорт — 61%, импорт — 41%, сальдо — 20%) и нулевым (Германия: экспорт — 6,2%, импорт — 6,4%, сальдо — примерно 0).

Во-вторых, значительные размеры экспорта и импорта электроэнергии могут быть следствием интенсивных обменов мощностью с целью реализации преимуществ совместной работы энергосистем разных стран как в пределах одного года, так и в разрезе более длительных периодов. Характерный пример этого типа стран: Норвегия с долей ГЭС 99,6% и Дания с долей ТЭС 100%. В 1991 г., когда производство электроэнергии в Норвегии значительно снизилось (примерно на 10%), в Дании оно резко возросло, а в 1992 г.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

*Таблица 5*

| Страна мира | Производство, всего, млрд. кВт·ч | Экспорт (+) импорт (-) | |
|---|---|---|---|
| | | млрд. кВт·ч | % |
| **Мир в целом** | 12318* | +423,80** | 3,4 |
| | | -423,46 | 3,4 |
| **Африка** | 340 | +6,27 | 1,8 |
| | | -4,75 | 1,4 |
| ЮАР | 176 | +2,60 | 1,5 |
| | | -0,10 | <1 |
| Египет | 48 | — | — |
| Алжир | 19 | +1,32 | 6,9 |
| | | -0,08 | <1 |
| Ливия | 17 | — | — |
| Нигерия | 12 | +0,10 | <1 |
| Марокко | 10 | -1,00 | 10 |
| Замбия | 8 | +1,50 | 18,8 |
| | | -0,02 | <1 |
| Зимбабве | 8 | -1,92 | 24 |
| Итого по 8 странам | 298 | | |
| **Азия** | 3301* | +74,15 | 2,2 |
| | | -84,10 | 2,5 |
| Япония | 907 | — | — |
| Китай | 839 | -5,20 | <1 |
| Индия | 357 | +0,16 | <1 |
| | | -1,40 | <1 |
| Южная Корея | 163 | — | — |
| Казахстан | 77 | +52,95 | 68,8 |
| | | -64,66 | 84,0 |
| Турция | 74 | +0,59 | <1 |
| | | -0,21 | <1 |
| Иран | 72 | — | — |
| Таиланд | 66 | +0,05 | <1 |
| | | -0,65 | 1 |
| Саудовская Аравия | 63 | — | — |
| Индонезия | 59 | — | — |
| Пакистан | 55 | — | — |
| Узбекистан | 49 | +0,13 | <1 |
| Северная Корея | 38 | — | — |
| Гонг Конг | 36 | +4,50 | 12,5 |
| Малайзия | 36 | +0,20 | <1 |
| | | -0,17 | <1 |
| Ирак | 26 | — | — |
| Израиль | 26 | +0,32 | 1,2 |
| Филиппины | 22 | — | — |
| Азербайджан | 19 | -0,01 | <1 |
| Сингапур | 19 | +0,05 | <1 |
| Кувейт | 18 | — | — |
| Таджикистан | 18 | +6,39 | 35,5 |
| | | -5,21 | 28,9 |
| О. Арабские Эмираты | 18 | — | — |
| Сирия | 13 | — | — |
| Туркменистан | 13 | — | — |
| Киргизстан | 11 | +6,64 | 60,4 |
| | | -5,80 | 52,7 |
| Вьетнам | 11 | — | — |
| Бангладеш | 10 | — | — |
| Грузия | 10 | -0,31 | 3,1 |
| Итого по 29 странам | 3125 | | |
| **Европа** | 4089* | +267,28 | 6,5 |
| | | -259,71 | 6,4 |
| Россия | 957 | +44,14 | 4,6 |
| | | -24,68 | 2,6 |
| Германия | 526 | +32,76 | 6,2 |
| | | -33,63 | 6,4 |
| Франция | 471 | +65,09 | 13,8 |
| | | -3,66 | <1 |
| Великобритания | 323 | -16,72 | 5,2 |
| Украина | 230 | +17,32 | 7,5 |
| | | -15,77 | 6,9 |
| Италия | 223 | +0,68 | <1 |
| | | -40,11 | 18,0 |
| Испания | 157 | +3,34 | 2,1 |
| | | -4,61 | 2,9 |
| Швеция | 144 | +8,57 | 6,9 |
| | | -7,98 | 5,5 |
| Польша | 134 | +8,01 | 6,0 |
| | | -5,60 | 4,2 |
| Норвегия | 120 | +8,38 | 7,0 |
| | | -0,60 | <1 |
| Нидерланды | 77 | +0,27 | <1 |
| | | -10,57 | 13,7 |

*Продолжение табл. 5*

| Страна мира | Производство, всего, млрд. кВт·ч | Экспорт (+) импорт (-) | |
|---|---|---|---|
| | | млрд. кВт·ч | % |
| Бельгия | 70 | +5,36 | 7,7 |
| | | -7,59 | 10,8 |
| Финляндия | 61 | +0,43 | <1 |
| | | -8,01 | 13,1 |
| Швейцария | 61 | +26,72 | 43,8 |
| | | -19,52 | 32,0 |
| Чехия | 59 | +8,06 | 13,7 |
| | | -5,95 | 10,1 |
| Румыния | 55 | +1,12 | 2,0 |
| | | -2,99 | 5,4 |
| Австрия | 53 | +8,81 | 16,6 |
| | | -8,07 | 15,2 |
| Греция | 38 | +0,28 | <1 |
| | | -1,09 | 2,9 |
| Болгария | 38 | +1,52 | 4,0 |
| | | -1,63 | 4,3 |
| Югославия (Ф.Р.) | 34 | +0,1 | <1 |
| | | -0,5 | 1,5 |
| Дания | 34 | +5,10 | 15,0 |
| | | -6,28 | 18,5 |
| Беларусь | 33 | +0,13 | <1 |
| | | -6,13 | 18,6 |
| Венгрия | 33 | +0,76 | 2,3 |
| | | -3,23 | 9,8 |
| Португалия | 31 | +1,90 | 6,1 |
| | | -2,08 | 6,7 |
| Словакия | 24 | +2,28 | 9,5 |
| | | -4,30 | 17,9 |
| Ирландия | 16 | — | — |
| Литва | 14 | +8,47 | 60,5 |
| | | -5,74 | 41,0 |
| Словения | 12 | +2,12 | 17,7 |
| | | -0,71 | 5,9 |
| Босния Герцоговина | 11 | +0,50 | 4,5 |
| | | -0,58 | 5,3 |
| Молдавия | 10 | +0,85 | 8,5 |
| | | -0,09 | <1 |
| Хорватия | 9 | +1,20 | 13,3 |
| | | -3,64 | 40,4 |
| Эстония | 9 | +1,60 | 17,8 |
| Итого по 32 странам | 4076 | | |
| **Океания** | 200 | — | — |
| Австралия | 164 | — | — |
| Нов. Зеландия | 31 | — | — |
| Итого по 2 странам | 195 | | |
| **Северная Америка** | 3873 | +45,32 | 1,2 |
| | | -45,73 | 1,2 |
| **США** | 3146 | +8,15 | <1 |
| | | -36,89 | 1,2 |
| Канада | 527 | +34,97 | 6,7 |
| | | -7,55 | 1,4 |
| Мексика | 135 | +2,01 | 1,5 |
| | | -0,91 | <1 |
| Пуэрто-Рико | 17 | — | — |
| Куба | 11 | — | — |
| Итого по 5 странам | 3836 | | |
| **Южная Америка** | 516 | +30,79 | 6,0 |
| | | -29,18 | 5,7 |
| Бразилия | 251 | +0,01 | <1 |
| | | -27,57 | 11,0 |
| Венесуэла | 71 | +0,30 | <1 |
| Аргентина | 63 | +0,02 | <1 |
| | | -1,27 | 2,0 |
| Колумбия | 40 | -0,30 | <1 |
| Парагвай | 31 | +28,12 | 90,7 |
| Чили | 24 | — | — |
| Перу | 14 | — | — |
| Уругвай | 8 | +2,33 | 29,1 |
| | | -0,01 | <1 |
| Эквадор | 7 | — | — |
| Итого по 9 странам | 509 | | |

* В отчетных данных ООН по производству электроэнергии эти цифры варьируются в диапазоне -0,3÷-1,2%.

** Разница в отчетных данных в статистике ООН вызвана методикой учета.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

*Таблица 6*

| Страна | Производство электроэнергии по годам, млрд кВт·ч | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | общее | Сальдо экспорт—импорт* | | общее | Сальдо экспорт—импорт | | общее | Сальдо экспорт—импорт | | общее | Сальдо экспорт—импорт | |
| | 1990 | | | 1991 | | | 1992 | | | 1993 | | |
| Швеция | 146,5 | 1,8 | (1,2) | 147,4 | 1,3 | (0,9) | 146,4 | 2,2 | (1,5) | 144,3 | 0,6 | (0,4) |
| Швейцария | 55,8 | 2,1 | (3,8) | 57,8 | 2,8 | (4,8) | 59,1 | 4,3 | (7,3) | 61,1 | 7,2 | (11,8) |
| Франция | 420,1 | 45,8 | (10,9) | 454,2 | 52,9 | (11,6) | 492,0 | 53,8 | (10,9) | 471,5 | 61,4 | (13,0) |
| Италия | 216,9 | -34,7 | (16,0) | 222,0 | -35,1 | (15,8) | 226,2 | -35,3 | (15,6) | 222,8 | -39,4 | (17,7) |
| Финляндия | 54,4 | -10,6 | (19,5) | 58,0 | -7,3 | (12,6) | 57,7 | -8,4 | (14,6) | 61,2 | -7,6 | (12,4) |
| Нидерланды | 71,9 | -9,2 | (12,8) | 74,3 | -9,2 | (12,4) | 77,2 | -8,7 | (11,3) | 77,0 | -10,3 | (13,4) |
| Алжир | 16,1 | 0,1 | (0,6) | 17,3 | 0,7 | (4,0) | 18,3 | 1,0 | (5,5) | 19,4 | 1,2 | (6,2) |
| Замбия | 7,8 | 1,5 | (19,2) | 7,8 | 1,5 | (19,2) | 7,9 | 1,5 | (19,0) | 7,9 | 1,5 | (19,0) |
| Зимбабве | 9,6 | -0,9 | (9,4) | 8,8 | -1,8 | (20,5) | 8,6 | -1,2 | (14,0) | 7,6 | -1,9 | (25,0) |
| Гонг-Конг | 29,0 | 1,8 | (6,2) | 31,9 | 3,1 | (9,7) | 35,1 | 5,0 | (14,2) | 36,4 | 4,5 | (12,4) |
| Канада | 482,0 | 0,4 | (<1) | 507,9 | 18,4 | (3,6) | 520,9 | 25,0 | (4,8) | 527,3 | 27,4 | (5,2) |
| Бразилия | 222,8 | -24,8 | (11,1) | 234,4 | -27,1 | (11,6) | 241,7 | -24,0 | (9,9) | 251,5 | -27,6 | (11,0) |
| Парагвай | 27,3 | 24,8 | (90,8) | 29,4 | 26,8 | (91,2) | 27,1 | 24,6 | (90,8) | 31,5 | 28,1 | (89,2) |
| Уругвай | 7,4 | 2,6 | (35,1) | 7,0 | 1,8 | (25,7) | 8,9 | 3,4 | (38,2) | 8,0 | 2,3 | (28,8) |

* В скобках — данные в %.

*Таблица 7*

| Страна | Производство, всего, млрд кВт·ч | Доля ГЭС, % | Доля АЭС, % | Экспорт | | Импорт | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | млрд кВт·ч | % | млрд кВт·ч | % |
| Мир в целом | 12318* | 19,4 | 17,7 | 423,8** | 3,4 | 423,5** | 3,4 |
| США | 3146 | 8,8 | 19,4 | 8,2 | <1 | 36,9 | 1,2 |
| Россия | 957 | 18,3 | 12,5 | 44,1 | 4,6 | 24,7 | 2,6 |
| Япония | 907 | 11,6 | 27,5 | — | — | — | — |
| Китай | 840 | 18,1 | 0,3 | — | — | 5,2 | <1 |
| Канада | 527 | 61,4 | 18,0 | 35 | 6,6 | 7,6 | 1,4 |
| Германия | 526 | 4,1 | 29,2 | 32,8 | 6,2 | 33,6 | 6,4 |
| Франция | 472 | 14,4 | 78,1 | 65,1 | 13,8 | 3,7 | <1 |
| Индия | 357 | 19,8 | 1,9 | 0,2 | <1 | 1,4 | <1 |
| Великобритания | 323 | 1,8 | 27,7 | — | — | 16,7 | 5,2 |
| Бразилия | 252 | 93,4 | 0,2 | — | — | 27,6 | 11,0 |
| Украина | 230 | 4,9 | 32,8 | 17,3 | 7,5 | 15,8 | 6,9 |
| Италия | 223 | 20,0 | — | 0,7 | <1 | 40,1 | 18,0 |
| ЮАР | 176 | 0,5 | 4,1 | 2,6 | 1,5 | 0,1 | <1 |
| Австралия | 164 | 10,1 | — | — | — | — | — |
| Южная Корея | 163 | 3,7 | 35,6 | — | — | — | — |
| Испания | 157 | 16,5 | 35,8 | 3,3 | 2,1 | 4,6 | 2,9 |
| Швеция | 144 | 52,3 | 42,6 | 8,6 | 6,0 | 8,0 | 5,5 |
| Мексика | 135 | 19,3 | 3,6 | 2,0 | 1,5 | 1,0 | <1 |
| Польша | 134 | 2,7 | — | 8,0 | 6,0 | 6,6 | 4,9 |
| Норвегия | 120 | 99,6 | — | 8,4 | 7,0 | 0,6 | <1 |
| Итого по 20 странам | 9953 | 17,7 | 19,7 | 236,3 | 2,4 | 234,2 | 2,4 |

* В отчетных данных ООН по производству электроэнергии за тот же год эта цифра ниже примерно на 0,5%.
** Разница в отчетных данных в статистике ООН вызвана методикой учета.

имела место обратная картина.

И, наконец, третья группа стран — устойчивые экспортеры или импортеры электроэнергии. Такие примеры даны в табл. 6.

Особого внимания заслуживает тот факт, что в табл. 5 и 6 цифры относительного импорта электроэнергии (сальдо) в размере более 10% собственного производства встречаются крайне редко.

Отдельного рассмотрения достойны и размеры экспорта — импорта электроэнергии в 20 странах — крупнейших производителях электроэнергии — табл. 7. Однако эти данные ничего нового к приведенному не добавляют.

**Выводы.** 1. В мире в целом продолжается рост производства электроэнергии несмотря на сложнейшие политико-экономические процессы на территории бывшего СССР и связанных с ним стран. За 1993 г. производство электроэнергии в мире выросло более чем на 1%.

2. Особенно быстро растет производство электроэнергии в Азии — прирост его за 1993 г. составил 6%. Наибольший вклад в этот процесс вносит Китай — абсолютный прирост производства электроэнергии в этой стране в 1993 г. составил 85 млрд. кВт·ч или около 11%.

3. Экспорт и импорт электроэнергии в среднем по миру составляет более 3% общего производства. Импорт электроэнергии по отдельным странам достигает нескольких десятков процентов, однако, как правило, редко превышает 10%.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

*СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. **Ершевич В.В.** О концепции создания Глобальной электроэнергетической системы. — Электричество, 1995 № 5.
2. **1993.** Energy Statistics Yearbook, United Nations, New York, 1995.
3. **Агеева Е.В., Ершевич В.В., Лебедев Б.П.** Развитие электроэнергетики мира в 1992 г. — Вестник электроэнергетики, 1995 № 1.

*[15.01.96]*

*Авторы: **Агеева Елена Васильевна** окончила факультет организации управления в энергетике Московского института управления в 1984 г. Заведующая группой института «Энергосетьпроект».*

***Ершевич Виктор Васильевич** окончил электроэнергетический факультет Харьковского политехнического института в 1959 г. В 1988 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Методические основы развития системообразующей сети ЕЭЭС СССР» в Сибирском энергетическом институте (г. Иркутск) Заместитель главного инженера института «Энергосетьпроект».*

# Магнитный подвес на основе высокотемпературных сверхпроводников для транспортных систем

**ЯКИМЕЦ И.В., ВИНОКУРОВ В.А., НАРОВЛЯНСКИЙ В.Г.**

*Рассмотрена система подвеса на основе использования высокотемпературных сверхпроводников в поле постоянных магнитов. Особенностью системы является локализация диамагнитного тела и источника магнитного поля на движущемся объекте при наличии ферромагнитной путевой структуры. Определены условия устойчивости транспортной системы относительно равновесного состояния и проведены оценки силовых и весовых характеристик подвеса.*

Ключевые слова: *транспортная система, магнитный подвес, высокотемпературные сверхпроводники*

*Suspension system on basis of high-temperature superconductors in field of constant magnets is proposed. Particulating of system is location of diamagnet body and sourse of magnetic field on moving object in system having ferromagnetic structure. Stabilizing conditions of transport system about relatively equilibration state was determined and strength ang weighted charachteristics of suspension was ashimated.*

Key words: *transport system, magnetic suspension, high-temperature, high-temperature superconductors*

Разработке магнитных опор посвящено много работ [1]. Применительно к транспорту наиболее полно исследованы и использованы на практике два типа подвесов: электродинамический и электромагнитный.

В электромагнитном подвесе реализуется эффект взаимодействия ферромагнитных тел с магнитным полем, созданным преимущественно электромагнитами постоянного тока. Для обеспечения устойчивости подвеса необходима специальная сервосистема стабилизации, основанная на регулировании тока обмоток при изменении пространственной координаты подвешенного тела и требующая существенного увеличения веса магнита и затрачиваемой мощности [2].

Электродинамический подвес реализует эффект взаимодействия токов, наведенных в электропроводящих элементах, с созданным индуктором постоянным или переменным магнитным полем. Устойчивость такого подвеса может быть обеспечена без дополнительного оборудования [3], однако он характеризуется зависимостью поддерживающей силы от скорости перемещения подвешенного тела, причем в момент остановки сила подвешивания равна нулю. В связи с этим электродинамический тип подвеса рекомендуется для перевозок на большие расстояния со скоростью около 500 км/ч.

Для отечественного транспорта наиболее реальной в течение ближайших 10—15 лет представляется система движения на ограниченные расстояния со скоростью не выше 300 км/ч, базирующаяся на использовании принципа электромагнитного подвеса с расположением активных элементов подвеса и двигателя на экипаже. В России разработан проект и создан экспериментальный экипаж пригородного сообщения с электромагнитным подвесом и линейным асинхронным двигателем модульного типа с максимальной скоростью 200 км/ч. С тем же приводом изготовлены макеты вагона метрополитена, трамвая, и поезда карьерного транспорта. При этом для обеспечения высоких энергетических и экономических показателей транспорта необходимо ре-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

шить проблему стабилизации экипажа без существующих затрат мощности и веса относительно возможных пространственных смещений поезда при его движении. Решение проблемы может быть найдено на основе использования диамагнитного способа стабилизации.

Несмотря на принципиальную простоту реализации диамагнитного стабилизатора [1], до настоящего времени такие устройства для целей подвеса транспорта не применялись по причине недостаточной величины развиваемой удельной силы, что связано с малой величиной восприимчивости обычных диамагнитных модулей. Ситуация изменилась в связи с появлением высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) материалов, выполненных по технологии, позволяющей получать объемные элементы крупнозернистой структуры с высокими значениями рабочих токов [4]. Обоснование устойчивости диамагнитного тела, помещенного в магнитное поле, было проведено в [5], дополнено и экспериментально подтверждено в [6 и 7]. В указанных статьях предложены и экспериментально проверены некоторые простые схемы подвеса диамагнитного материала в поле постоянных магнитов.

Известно, что диамагнетик, внесенный во внешнее магнитное поле, намагничивается в направлении, обратном направлению поля, что связано с Ларморовой прецессией электронных оболочек атомов. В результате каждый локальный элемент объема диамагнитного тела приобретает некоторый магнитный момент, также направленный против основного поля. Можно полагать, что реакция сверхпроводникового тела на внешнее магнитное поле аналогична реакции диамагнитного тела, по крайней мере по качественному характеру изменения внешнего поля в окрестностях тела. В связи с этим результаты, полученные для тел диамагнитной природы, можно применять для сверхпроводниковых тел, в частности, для оценочного анализа силовых взаимодействий.

Объемные ВТСП материалы могут рассматриваться как диамагнитные элементы с высоким значением величины магнитной восприимчивости и, соответственно, близкой к нулю величиной вещественной части комплексной магнитной проницаемости, а диссипативные потери могут учитываться соответствующей величиной мнимой части комплексной магнитной проницаемости.

При формировании принципиальной схемы подвеса с использованием ВТСП элементов будем исходить из необходимости реализации следующих условий:

система подвеса должна обеспечить состояние устойчивого равновесия в вертикальном направлении и состояние безразличного равновесия в продольном направлении вдоль путевой структуры;

активные элементы подвеса содержат, по крайней мере, два компонента: диамагнитный, выполненный из ВТСП материала, и источник магнитного поля, выполненный на основе постоянных магнитов и/или электромагнитов, причем активные элементы подвеса расположены на подвижном теле и механически жестко связаны друг с другом;

пассивным элементом подвеса является путевая структура, выполненная на основе магнитопроводящих материалов;

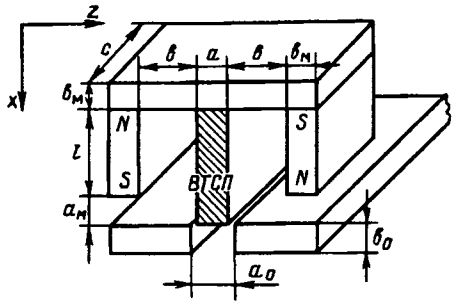
демпфирование колебаний, возникающих около равновесного положения обеспечивается за счет свойств применяемого ВТСП материала, который характеризуется определенным уровнем диссипативных потерь в переменном магнитном поле [8].

Ниже изложены результаты анализа силовых характеристик принципиальной схемы подвеса, отвечающей указанным условиям, и определены основные соотношения геометрических размеров, при которых обеспечивается статическая устойчивость системы без применения дополнительных средств регулирования.

Конструктивно рассматриваемая система подвеса может быть выполнена согласно рисунку. Устройство содержит постоянный магнит или электромагнит, в центральной части которого укреплен диамагнитный элемент. Путевая структура выполнена в виде ферромагнитного шунта с зазором напротив полюса диамагнитного элемента. Полюс диамагнитного элемента выступает над полюсами магнита на величину начального магнитного зазора. Источник магнитного поля активной части подвеса создает в зазоре пассивной части (путевой структуре) магнитное поле, которое используется для опоры на него диамагнитного элемента. Поскольку одновременно с перемещением диамагнитного элемента изменяется и величина потока источника намагничивания, то суммарная система взаимодействия активной и пассивной частей системы, определяемая как разность сил притяжения полюсов магнита и силы выталкивания диамагнетика из зазора ферромагнитного шунта, зависит от взаимного расположения активной и пассивной частей подвеса. При этом возникает принципиальная возможность получить устойчивое состояние подвеса как при размещении его над путевой структурой с опорой на силу отталкивания, так и под путевой структурой с опорой на силу притяжения.

При анализе силовых характеристик подвеса примем допущение, что магнитная схема цепи является идеальной, т. е. магнитный поток целиком замыкается по магнитопроводу, магнитное поле в зазорах однородное, а диамагнетик пол-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru




Принципиальная схема магнитного подвеса

ностью выталкивает поле из своего объема. В общем случае задача определения силы, действующей на диамагнетик в поперечном зазоре, не поддается аналитическому расчету, поскольку распределение поля в зазоре имеет сложный характер и зависит от формы зазора и положения диамагнитного тела. При проведении качественных оценок будем считать, что зазор выполнен таким образом, чтобы обеспечить вблизи поверхности диамагнитного тела направление магнитного поля, параллельное этой поверхности. В этом случае давление на диамагнетик ортогонально его поверхности, расположенной в зазоре, а суммарное усилие выталкивания определяется интегралом [1]:

$$f_д = \int f\,ds = \int 0{,}5\mu_0(\mu-1)\nabla(H^2)\,ds = f_{ср}\,s\,,$$

где $f_{ср}$ — средняя величина давления в однородном плоскопараллельном поле, обеспечивающая суммарный эффект, соответствующий действительному усилию на диамагнитное тело.

Рассмотрим магнитную систему (рисунок) с площадью сечения полюсов $S_м=b_м c$, полагая наличие в ней МДС $F_0$. Соответственно, площадь сечения диамагнитного элемента считаем равной $S_д=a_0 c$, а площадь сечения путевой структуры $S_0=b_0 c$. При условии однородности поля в зазорах магнитной системы сила притяжения полюсов магнита к путевой структуре

$$f_м = \Phi^2/\mu_0 S_м\,, \qquad (1)$$

где Ф — поток в магнитной системе.

Сила выталкивания диамагнитного тела из зазора $a_0$ характеризуется выражением, определенным из условия магнитного давления:

$$f_д = -\Phi^2 S_д/2\mu_0 S_0^2(1-x/b_0)^2\,. \qquad (2)$$

При определении $f$ использовалось соотношение для изменения площади торца зазора при перемещении подвеса:

$$S_0(x) = S_0(1-x/b_0)\,.$$

Суммарная сила взаимодействия подвеса с путевой структурой определяется как

$$f_\Sigma=f_м+f_д=\frac{\Phi^2}{\mu_0 S_м}[1-S_м S_д/2S_0^2(1-x/b_0)^2]\,, \qquad (3)$$

Для расчета величины магнитного потока $\Phi(x)$ используем уравнение магнитной цепи в виде

$$F_0 = \frac{\Phi(x)}{\mu_0}\left[\frac{2a(x)}{S_м}+\frac{a_0}{S_0(x)}\right], \qquad (4)$$

где $a(x)=a_м-x$; $F_0$ — магнитодвижущая сила.

Переходя к относительной координате $\zeta=x/a_м$, из соотношения (4) имеем

$$\Phi(\zeta)=\mu_0 F_0/[2a_м(1-\zeta)/S_м+a_0/S_0(1-a_м\zeta/b_0)]\,, \qquad (5)$$

а вводя безразмерные параметры

$$\theta = \frac{a_0 b_м}{2b_0^2} = \frac{S_д S_м}{2S_0^2}\,, \qquad \alpha = a_м/b_0\,,$$

после подстановки (5) в (3) получаем выражение для суммарной силы подвеса:

$$f_\Sigma(\zeta,\theta) = f_{м0}\frac{1-\theta/(1-\alpha\zeta)^2}{[1-\zeta+\theta/\alpha(1-\alpha\zeta)]^2}\,, \qquad (6)$$

где $f_{м0}=\frac{\mu_0 S_м F_0^2}{4a_м}$ — величина базовой силы притяжения магнита (при $\theta=0$, $\zeta=0$, $\alpha(0)=0$).

В зависимости от соотношения геометрических размеров числитель выражения суммарной силы подвеса в исходном положении ($\zeta=0$) может быть как положительным, так и отрицательным, т.е. можно реализовать как притяжение, так и отталкивание.

Условием притяжения подвеса к путевой структуре является $\theta<1$, условием отталкивания $\theta>1$.

Для удобства анализа силовой характеристики подвеса преобразуем выражение (6) к системе координат:

$$\gamma = 1-\alpha\zeta\,. \qquad (7)$$

Тогда

$$f_\Sigma(\gamma,\theta) = f_{м0}\frac{\alpha^2(\gamma^2-\theta)}{[\theta-\gamma(1-\alpha)+\gamma^2]^2}\,. \qquad (8)$$

Поскольку $\zeta=x/a_м$, $0\leqslant\zeta\leqslant1$, $\alpha=a_м/b_0$ и зазор между подвесом и путевой структурой не может быть произвольно большим, то ограничимся рассмотрением зазора $a_м$, сравнимого с толщиной магнитопровода $b_0$. В этом случае $0\leqslant\alpha\leqslant1$ и физически обоснованная область изменения аргумента $\gamma$ имеет вид

$$0\leqslant\gamma\leqslant1\,. \qquad (9)$$

Рассмотрим функцию $f_\Sigma(\gamma,\theta)$ в интервале он-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ределения $\gamma$:

при $\gamma=0$, $\zeta=1/\alpha$

$$\frac{f_\Sigma(0,\theta)}{f_{м0}} = \alpha^2/\theta \quad \text{— отталкивание;}$$

при $\gamma=1$, $\alpha\zeta=0$.

$$\frac{f_\Sigma(1,\theta)}{f_{м0}} = \alpha^2\frac{1-\theta}{(\theta+\alpha)^2}\left.\right\} \begin{array}{l}\text{— притяжение при } \theta<1;\\ \text{— отталкивание при } \theta>1.\end{array}$$

Таким образом, существует принципиальная возможность получения при взаимодействии подвеса с путевой структурой силовой характеристики, имеющей точку равновесия.

Приложение внешней силы и веса магнитной системы приводит к смещению положения равновесия, причем необходимо учитывать направление силы веса $G$ по отношению к силе $f_\Sigma(\gamma,\theta)$ в зависимости от расположения подвеса относительно путевой структуры. В общем случае функция суммарной силы, действующей на подвес, имеет вид

$$F_\Sigma = f_{м0}\left\{\delta g + \alpha^2\frac{(\gamma^2-\theta)}{[\gamma^2-(1-\alpha)\gamma+\theta]^2}\right\}, \quad (10)$$

где $g=G/g_{м0}$, $\delta=1$ для силы $G$, действующей на подвес, расположенный сверху путевой структуры, и $\delta=-1$ для силы $G$, действующей на подвес, расположенный снизу путевой структуры.

Для существования равновесия необходимо, чтобы $F_\Sigma=0$ в некоторой точке $\gamma=\gamma_0$, а для того, чтобы равновесие было устойчивым, сила $F_\Sigma$ должна быть возвращающей к точке равновесия, т. е. при увеличении зазора $\Delta_м$ — положительной, а при уменьшении зазоров — отрицательной.

Определив величину зазора как

$$\Delta_м = a_м - x = a_м(1-\zeta),$$

выразим $\gamma$ в преобразованном виде:

$$\gamma = 1-\alpha+\alpha\frac{\Delta_м}{a_м}. \quad (11)$$

Как видно из выражения (11), величина $\gamma$ увеличивается при увеличении зазора и уменьшается при его уменьшении. Вследствие этого условием устойчивого равновесия является положительный знак производной $\partial F_\Sigma/\partial\gamma$ в точке $\gamma_0$, и состояние устойчивого равновесия экипажа, использующего рассматриваемый принцип подвеса, определяется уравнениями

$$F_\Sigma(\gamma_0)=0,\ \partial F_\Sigma(\gamma)/\partial\gamma>0 \text{ при } \gamma=\gamma_0. \quad (12)$$

В общем случае уравнение (12) можно решить численными методами при конкретных исходных параметрах. Однако для проведения качественных оценок можно предположить, что подвес не очень сильно смещается из положения равновесия под действием веса экипажа. Такое предположение базируется на том, что подвес транспортных систем должен иметь высокую жесткость, а кроме того, компенсация веса экипажа может быть обеспечена другими источниками силы, например электромагнитами.

С учетом изложенных допущений рассмотрим уравнения

$$\frac{F_{м0}\alpha^2(\gamma^2-\theta)}{[\gamma^2-(1-\alpha)\gamma+\theta]^2}=0; \quad (13)$$

$$\partial F_\Sigma(\gamma,\theta)/\partial\gamma>0 \text{ при } \gamma=\gamma_0.$$

Точкой равновесия является

$$\gamma_0=\sqrt{\theta}, \quad \zeta=(1-\sqrt{\theta})/\alpha, \quad (14)$$

а производная силы

$$\frac{1}{f_{м0}}\frac{\partial f_\Sigma(\gamma,\theta)}{\partial\gamma}=\frac{2\alpha^2[3\gamma\theta-\theta(1-\alpha)-\gamma^3]}{[\gamma^2-(1-\alpha)+\theta]^3}. \quad (15)$$

В точке равновесия ($\gamma=\gamma_0$) имеем

$$\frac{1}{f_{м0}}\frac{\partial f_\Sigma(\gamma,\theta)}{\partial\zeta}\Big|_{\gamma=\gamma_0}=\frac{2\alpha^2}{\sqrt{\theta}(2\sqrt{\theta}-1+\alpha)^2}, \quad (16)$$

т. е. величина производной силы положительна и равновесие устойчиво.

С учетом соотношения

$$\gamma(\zeta)=1-\zeta\alpha$$

условие устойчивого равновесия может представлено в виде

$$\frac{1}{f_{м0}}\frac{\partial f_\Sigma(\zeta,\theta)}{\partial\zeta}=\frac{2\alpha^3}{\sqrt{\theta}(2\sqrt{\theta}-1+\alpha)^2}. \quad (17)$$

В данном случае, поскольку увеличение $\zeta$ приводит к уменьшению зазора, знак производной силы для точки устойчивого равновесия должен быть отрицательным.

Таким образом, при проведении оценочных расчетов силовое взаимодействие в исследуемой схеме подвеса можно описать совокупностью следующих соотношений:

базовая величина силы магнитной системы

$$f_{м0}=\mu_0 S_м F_0^2/4a_м^2; \quad (18)$$

точка равновесия

$$\zeta_0=(1-\sqrt{\theta})/\alpha, \quad x=b_0(1-\sqrt{\theta}); \quad (19)$$

жесткость в точке равновесия

$$\frac{\partial f_\Sigma}{\partial\zeta}=-\frac{2\alpha^3F_{м0}}{\sqrt{\theta}(2\sqrt{\theta}-1+\alpha)^2}; \quad (20)$$

усилие подвеса в положении, близком к точке равновесия,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$f_\Sigma = \frac{\partial f_\Sigma}{\partial \zeta} - (\zeta - \zeta_0) = \frac{2F_{м0}\,\alpha^3\,\Delta\zeta}{\sqrt{\theta}\,(2\sqrt{\theta} - 1 + \alpha)^2}. \quad (21)$$

При проведении силовых и весовых оценок рассматриваемой системы подвеса будем ориентироваться на использование высокоэнергетических постоянных магнитов на основе сплавов редкоземельных металлов [9]. Указанные магниты имеют высокие технические характеристики: максимальное энергетическое произведение $(BH)_м$>300 кДж/м$^3$, коэрцитивную силу $H_{см}$> >3000 кА/м, остаточную индукцию $B_r$>1 Тл, относительную магнитную проницаемость $\mu \sim 1$. Отличительной особенностью высокоэнергетических магнитов является высокое значение константы кристаллографической анизотропии, обеспечивающее преимущественное прохождение магнитного потока вдоль направления намагничивания. Последнее обстоятельство повышает эффективность использования такого типа магнитов в магнитных системах с зазорами, снижая величину боковых потоков рассеяния.

В качестве диамагнитного тела предлагается использовать текстурированные массивные ВТСП материалы с критической плотностью тока $J_c=10^8$ А/м$^2$ в поле $B=1$ Тл. При этом на ВТСП возлагаются функции не только обеспечения требуемой жесткости, т. е. возврата объекта в положении равновесия при его смещении под действием внешних сил, но и обеспечение затухания, определяющего быстроту возврата объекта в равновесное состояние. Затухание колебаний непосредственным образом связано с диссипативными процессами в сверхпроводнике, находящемся в переменном магнитном поле при относительном движении диамагнитного тела в зазоре путевой структуры. В жестких сверхпроводниках, к которым относятся и ВТСП материалы, диссипация энергии за период равна площади гистерезисной петли намагничивания и остается практически постоянной вплоть до самых низких частот. С этой точки зрения текстурированные крупнодоменные ВТСП материалы, обладающие широкой петлей гистерезиса, могут рассматриваться в качестве базовых элементов сверхпроводниковых систем демпфирования вибраций [8].

В качестве исходных параметров используем данные об экипаже на магнитном подвесе длиной 30 м с количеством пассажиров 150 человек, приведенные в [10]: вес экипажа $G=4{,}5\times10^4$ кг, минимальный клиренс $h_0=1$ см, вес магнитов и линейного двигателя, включая сервомеханизмы для систем управления $G_м=1{,}4\times10^4$ кг, одночастотный критерий плавности движения $a=0{,}05g$ при $f=4$ Гц.

При выполнении сверхпроводниковым подвесом функций обеспечения плавности движения экипажа требуемый коэффициент упругости (жесткость) можно оценить как

$$K = \frac{\partial f}{\partial x} = Ga/Z_0, \quad (22)$$

где $Z_0$ — естественное сжатие «магнитной пружины».

Если экипаж поддерживается на постоянной высоте $h_0$, то можно предположить, что $Z_0$ составляет часть $h_0$, например $0{,}1h_0$.

Резонансная частота системы

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{K/G}. \quad (23)$$

Подставляя в (22), (23) исходные данные, имеем

$$K=220{,}5\times10^3 \text{ Н/см}, \quad f=3{,}5 \text{ Гц}.$$

В соответствии с критерием плавности движения при обеспечении подвесом полученных характеристик пассажир не будет испытывать неудобства из-за резонансных колебаний экипажа при движении.

Для оценки соответствия характеристик диамагнитного подвеса требованиям плавности движения экипажа рассмотрим «единичную» систему, выполненную согласно рисунку с соотношением геометрических размеров

$$b = b_м = l = c = a_м = a.$$

Соответственно объем «единичной» системы

$$V_1 = 9a^3.$$

Принимая среднюю плотность веса магнитной системы равной $\rho=0{,}008$ кг/см$^2$, имеем $G_1=0{,}072a^3$.

При выбранной величине зазора $a_м=h_0=1$ см вес «единичной» системы составит $G_1=0{,}072$ кг.

Пусть величина зазора $a_м$ сравнима с толщиной $b_0$ магнитопровода путевой структуры, т. е. $a_м/b_0=1$. Тогда $\theta=0{,}5$, а определенный в соответствии с (20) коэффициент упругости

$$K_1 = \frac{\partial f_\Sigma}{\partial x} = -1{,}41 f_{м0}.$$

Определяя МДС $F_0$ постоянного магнита в виде $F_0=B_r l/\mu\mu_0$, где $l$ — длина магнита, для базовой величины силы «единичной» магнитной системы имеем

$$f_{м0} = S_м B_r^2 \left(\frac{l}{a_м}\right)^2 / 4\mu_0\mu^2.$$

При принятых $\mu=1$, $B_r=1$ Тл, $S_м=1$ см$^2$, $l=a_м$ базовая величина силы магнитной системы равна $f_{м0}$ = 19,6 Н, а коэффициент упругости $K_1$=

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

=-27,63 Н/см. Сравнивая требуемый коэффициент упругости экипажа с коэффициентом упругости, создаваемым «единичной» системой, определяем общий вес диамагнитного подвеса на основе ВТСП:

$$G_д = 0{,}575 \times 10^3 \text{ кг.}$$

Если даже реальный вес сверхпроводникового подвеса превысит полученное значение в 2 раза, то и в этом случае он составит только 7% веса магнитов, линейного двигателя и сервомеханизмов управления, определенных согласно [10]. В то же время использование сверхпроводниковых элементов в комбинированной системе подвеса экипажа позволит значительно уменьшить вес и потребляемую мощность базовых электромагнитов при существенном снижении глубины регулирования тока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Метелин В.Б.** Магнитные и магнитогидродинамические опоры. — М.: Энергия, 1968.

2. **Багрянцев В.И., Неварко В.С., Рабинович Б.И.** Математическая модель вагона с электромагнитной подвеской. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1981, № 1.

3. **Глухарев К.К., Исаков А.В., Фролов К.В.** К проблеме устойчивости транспорта на магнитном сверхпроводящем подвесе. — Проблемы машиностроения и надежности машин, 1994, № 2.

4. **Visualization** of weak links in melt-textured YBCO ceramiks / V.K. Vlasko-Vlasov, V.N. Goncharov, V.I. Nikitenko et al. — Physika C, 1994, vol 222.

5. **Practikal** alaptation in bulksuperconducting magnetic bearing applikation / C.K. McMichael, K.B. Ma, M.A. Lamb et. al. — Appl. Phis. Lett, 1992, № 60, (15).

6. **Braunbek W.** Freies Schweben diamagnetischen Korner in Magnetfield. — Z. Fur Phisik, 1939, № 112.

7. **Waldron R.D.** Levitation usind pirolitik graphite. — Rev. of Sci. Instrum. 1966 № 37.

8. **Электродинамическое** демпфирование вибраций с использованием высокотемпературных сверхпроводников / О.Л. Полущенко, Н.А. Нижельский, Ю.А. Башкиров и др. — Вестник МГТУ. Сер. приборостроение, 1994, № 4.

9. **Стома О.А., Ремизов В.Е.** Использование высокоэнергетических постоянных магнитов в электромеханике. — Тр. ВНИИЭМ, 1987, т. 85.

10. **Фонер О., Шварц Б.** Сверхпроводящие машины и устройства. — М.: Мир, 1977.

*[20.10.95]*

*Авторы:* ***Якимец Игорь Владимирович*** *окончил в 1961 г. факультет электрификации Московского института электрификации и механизации сельского хозяйства. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию в Московском энергетическом институте по специальности «Электрические машины». Главный научный сотрудник НИИ «Энергосетьпроект».*

***Винокуров Владимир Алексеевич*** *окончил Военно-воздушную академию им. проф. Н.Е. Жуковского в 1944 г. В 1962 г. защитил докторскую диссертацию по разработке авиационных аппаратов для высотных сверхзвуковых летательных аппаратов. Профессор кафедры «Электрические машины» Московского государственного университета путей сообщения.*

***Наровлянский Владимир Григорьевич*** *окончил электрофизический факультет Ленинградского электротехнического института. В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Теоретическая электротехника» в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского. Старший научный сотрудник НИИ «Энергосетьпроект».*

**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, Главпочтамт, абонементный ящик № 648.** Телефоны для справок: **924-24-80, 928-88-69.**

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# Оценка колебательности электромеханического переходного процесса в электроэнергетической системе

ЗЕЛЕНОХАТ Н.И., БАРГУТИ Х.С., ЛЕВЧЕНКО С.А.

*Для оценки колебательности переходного электромеханического процесса в сложной электроэнергетической системе ЭЭС предлагается формировать показатели: интегральный показатель, отражающий убывание кинетической энергии взаимных качаний роторов синхронных машин ЭЭС, и определяемую на его основе эквивалентную постоянную времени затухания переходного процесса. Приводятся результаты расчетов на ЭВМ для сложной ЭЭС, подтверждающие соответствие численных значений показателей критериев колебательности переходного процесса.*

Ключевые слова: *электроэнергетическая система, синхронная машина, переходный процесс, колебания, расчет*

*In order to estimate the electromechanical oscillations under transient conditions in large electrical power system (EPS), it is supposed to generate some exponents: the integrated exponent which indicates the decreasing of kinetic energy in the interconnected system of the swing machine rotors in EPS, and equivalent time constant of the period of oscillations related to the integrated exponent. The results of calculations for a large EPS are presented confirming the rightness of proposed exponents.*

Key words: *electrical power system, synchronous machine, transient phenomena, oscillations, calculation*

При сохранении устойчивости возникающий в электроэнергетической системе (ЭЭС) колебательный электромеханический переходный процесс после резкого возмущения может затухать сравнительно быстро либо продолжаться довольно длительное время. При определенных условиях колебательный процесс может не затухать (автоколебательный процесс).

Быстрое затухание колебательного переходного процесса и его приближение к монотонному (апериодическому) считается показателем хорошего качества переходного процесса. Однако при оценке качества переходного процесса необходимо учитывать также и размах колебаний параметров режима, так как большие и продолжительные отклонения углов сдвига роторов генераторов в процессе их качаний обусловливают адекватные им изменения напряжения в узлах нагрузки и негативно отражаются на качестве электроэнергии в ЭЭС и в системах электроснабжения и при этом возможно опрокидывание асинхронных двигателей при глубоких и продолжительных снижениях напряжения в узлах нагрузки. Поэтому при оценке качества переходного процесса в ЭЭС не ограничиваются только временем затухания переходного процесса в ЭЭС $t_{зат}$, а ищут более информативно емкие показатели качества.

Заслуживает внимания интегральный показатель

$$I_x = \int_0^\infty x^2\,dt, \qquad (1)$$

где $x$ — параметр режима, характерно изменяющийся в переходном процессе.

Применительно к ЭЭС обычно под $x$ понимают угол сдвига ротора генератора $\delta$ относительно вектора напряжения шин бесконечной мощности в случае исследования переходного процесса в простейшей ЭЭС ($x=\delta$). Очевидно, наиболее быстротечному переходному процессу отвечает условие минимума (1).

В сложной ЭЭС можно было бы использовать ($I$) применительно к какому-либо одному параметру режима $x_i$, однако в этом случае минимизация ($I$) не может гарантировать затухание всего переходного процесса в системе. Более того, длительно повторяющиеся колебания могут способствовать раскачиванию роторов удаленных генераторов. Поэтому, например в [1], приводится более сложная форма, основывающаяся на использовании ($I$):

$$I_F = \int_0^\infty F(x_1, \dots, x_n)\,dt, \qquad (2)$$

где $x_1, \dots, x_n$ — параметры режима (не обязательно угла сдвига роторов); $F(x_1, \dots, x_n)$ — некоторая, специально подобранная, определенно-положительная, а именно квадратичная форма параметров режима:

$$F(x_1, \dots, x_n) = \sum_i^n x_i^2.$$

Однако определяемые в формуле (2) интегральные показатели не в полной мере характеризуют качество переходного процесса, так как они в равной мере оценивают влияние качания роторов маломощного и наиболее крупного генераторов на качество переходного процесса в ЭЭС в целом — только по отклонению их параметров режима (углов), хотя эти генераторы имеют разную степень подвижности, обусловлен-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ную неодинаковыми значениями их постоянных инерции.

Известны и иные формы выражения подынтегральных функций, также как в (1) и (2) заимствованные из многочисленных публикаций по теории автоматического регулирования. Однако при их построении в основу положен принцип обобщения от простого к сложному, который применительно к многомашинной ЭЭС в силу ее специфических особенностей не во всех случаях является эффективным. Более оправданным представляется подход [2], когда формирование показателей качества переходного процесса увязывается с выявлением динамических свойств системы.

В развитие этого подхода в статье ставится цель: сформировать показатели, характеризующие в достаточно полной мере качество (колебательность) переходного процесса в сложной ЭЭС, и оценить их эффективность.

*Анализ и оценка колебательности переходного процесса в простейшей ЭЭС.* Исследуем колебательность и условия затухания переходного процесса, используя математическое описание в виде [1]:

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{\text{т}} - \frac{EU}{x_{d\Sigma}} \sin\delta - P_d \frac{d\delta}{dt},$$

где $P_d$ — демпферный коэффициент.

Остальные обозначения соответствуют принятым в [1].

Считаем, что к ЭЭС приложено мгновенно действующее возмущение. достаточно малое, чтобы можно было проводить исследование в малых отклонениях параметров режима:

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + 2\alpha \frac{d\Delta\delta}{dt} + \omega_0^2 \Delta\delta = 0, \qquad (3)$$

где $\omega_0$ и $\alpha$ — соответственно собственная частота качаний ротора ЭЭС при отсутствии в ней затухания (при $P_d=0$) и коэффициент затухания [3]:

$$\omega_0 = \frac{EU}{T_J x_{d\Sigma}} \cos\delta_0; \qquad \alpha = \frac{P_d}{2T_J}. \qquad (4)$$

Изменение во времени отклонения угла сдвига ротора генератора можно представить в виде

$$\Delta\delta = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi), \qquad (5)$$

где

$$A = 2\sqrt{A_{12}^2 + B_{12}^2}; \quad \varphi = \operatorname{arctg}\frac{A_{12}}{B_{12}}; \qquad (6)$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}. \qquad (7)$$

Обычно в ЭЭС $\omega_0^2 > \alpha^2$ и переходный процесс является колебательным.

Анализ (5) показывает, что свободный переходный процесс после снятия возмущения имеет форму затухающих колебаний с частотой свободных колебаний $\omega$ и коэффициентом затухания $\alpha$, который характеризует скорость затухания переходного процесса

Для количественной оценки интенсивности затухания переходного процесса можно использовать логарифмический декремент затухания [4]:

$$g = \alpha T = \ln[A(t)/A(t+T)], \qquad (8)$$

где $T$ — период затухающего колебательного процесса $T=2\pi/\omega$; $A(t)$ и $A(t+T)$ — значения амплитуды колебания в момент времени $t$ и $t+T$ соответственно.

С учетом (4), (6) и (8) для обеспечения затухания переходного процесса достаточно

$$0 < P_d < EUT_J \cos\delta_0 / x_{d\Sigma}.$$

Показатели качества переходного процесса $g$ и $\alpha$ в простейшей ЭЭС можно определить по известной характеристике $\delta(t)$, а также вычислить по формулам (4), (8), если известен демпферный коэффициент $P_d$.

Однако демпферный коэффициент $P_d$ даже в случае одиночно работающего генератора на шины бесконечной мощности определяется из сложного выражения для асинхронного момента [1]. Для упрощения учитываем лишь первый член этого выражения:

$$P_d = \frac{U^2(x_d - x_d')}{x_d x_d'} T_d' \sin^2\delta_0. \qquad (9)$$

Даже в этом случае коэффициент $P_d$ является неоднозначно определенным, так как даже при допущении постоянства напряжения $U$ он является зависящим от начального (конечного) значения угла $\delta_0$ (рис. 1). В действительности же $P_d$ является переменной во время всего переходного процесса в зависимости от значения угла $\delta=f(t)$.

Если бы переходный процесс был апериодическим (при $\omega_0^2<\alpha^2$), то угол описывался бы эквивалентной экспоненциальной кривой при

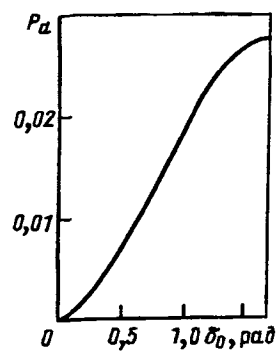



**Рис. 1.** Зависимость $P_d$ в функции угла $\delta_0$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$p_{1,2}=-\alpha\pm\sqrt{\alpha^2-\omega_0^2}$, для которой может быть определена постоянная времени $T_э$, называемая результирующей или эквивалентной постоянной времени [5].

Экспериментально постоянную $T_э$ можно определить по кривой $\delta(t)$ как отрезок времени, в течение которого отклонение изменяющегося по экспоненте значения $\delta$ от исходного установившегося значения $\delta=\delta_0$ изменяется в $e^{-1}$ раз.

Как уже отмечалось, в ЭЭС переходный процесс является колебательным, однако некоторая аналогия между переходным процессом в простейшей и сложной ЭЭС, рассматриваемой в целом, может быть установлена и использована для формирования показателей качества переходного процесса.

*Анализ и оценка колебательности переходного процесса в сложной ЭЭС.* Казалось бы, для оценки колебательности переходного процесса в сложной ЭДС достаточно распространить на него рассмотренные ранее показатели, определяемые для переходного процесса в простейшей ЭЭС. Однако такие понятия, как период колебаний, логарифмический декремент затухания колебательного переходного процесса, как и математические выражения (4) и (8) в общем случае применительно к сложной ЭЭС утрачивают привычный для исследователя смысл.

То же можно сказать и о демпферном коэффициенте. Так в сложной ЭЭС для определения асинхронного момента и на его основе демпферных моментов (демпферных коэффициентов) между генераторами $i$ и $j$ используется выражение [6]:

$$M_{ac\,ij}=Y_{ij}^2\left[M_{ac\,max\,i}x_{di}'E_{qj}'^2\left(\frac{s_i-s_j}{s_{кр.ac\,i}}\right)+\right.$$

$$\left.+M_{ac\,max\,j}x_{dj}'^2E_{qj}'^2\left(\frac{s_i-s_j}{s_{кр.ac\,j}}\right)\right],\qquad(10)$$

где $s_i$ и $s_j$ — скольжения роторов генераторов $i$ и $j$, причем $s_i-s_j\leqslant s_{кр.ac}$.

Если $s_i-s_j>s_{кр.ac}$, то принимается $(s_i-s_j)/$ $/s_{кр.ac}=1$; $Y_{ij}$ — взаимная проводимость между узлами генераторов $i$ и $j$; $M_{ac\,max}$ — максимальное значение асинхронного момента, определяемое при $s=s_{кр.ac}$; $E_1'$ — проекция переходной ЭДС за переходным сопротивлением $x_d'$.

Очевидно, в сложной ЭЭС с учетом АРВ сложности в определении коэффициентов $P_{dij}$ даже на основе (10) еще в большей мере возрастают, а вместе с этим возрастают и трудности с проведением аналитических исследований динамических свойств ЭЭС на основе анализа описывающих переходные процессы дифференциальных уравнений. Требуется разработка новых подходов, ориентированных на обобщенные представления явлений, сопровождающих переходные процессы в ЭЭС.

При разработке таких обобщенных подходов могут быть использованы некоторые положения аналитической механики. Заслуживает внимания так называемый принцип Мопертюи [4], согласно которому движение консервативной механической системы между двумя заданными ее положениями в моменты времени $t_0$ и $t_1$ с заданной начальной кинетической энергией $W_0$ происходит так, что имеет наименьшее значение интеграл:

$$I=\int_{t_0}^{t_1}2W\,dt=\min.\qquad(11)$$

Этот принцип называется также принципом наименьшего действия, а (11) — действием по Лагранжу, так как это выражение получено Мопертюи на основе уравнения Лагранжа 2-го рода.

Распространяя этот принцип на неконсервативную регулируемую систему, можно сформулировать его так: выполнением условия (11) обеспечивается затухание переходного процесса с наименьшей колебательностью при переходе системы из начального возмущающего состояния (момент времени $t_0$) в конечное состояние установившегося равновесия (момент времени $t_1$).

Справедливость такого подхода подтверждается физическими представлениями и результатами расчетов переходных процессов в сложной ЭЭС [2]. Если в (11) подставить выражение для кинетической энергии в виде

$$W=\sum_i^n T_{Ji}\omega_i^2,\qquad(12)$$

то условие (11) будет отражать колебательность не только взаимного движения роторов синхронных машин, но и движение их как целого — частоты ЭЭС [7].

Для исследования колебательности только во взаимном движении роторов воспользуемся теоремой Кенига [4] и представим энергию (12) в виде двух составляющих:

$$W=W_э+W',$$

где $W_э$ — кинетическая энергия движения ЭЭС как целого:

$$W_э=\frac{1}{2}T_{Jэ}\Delta\omega_э^2;\qquad(13)$$

$W'$ — кинетическая энергия движения системы относительно траектории ее движения как целого:

$$W'=\frac{1}{2}\sum_i^n T_{Ji}\omega_{iэ}^2.\qquad(14)$$

Здесь принято:

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$\omega_{i\text{э}} = \omega_i - \omega_\text{э}; \quad \Delta\omega_\text{э} = \omega_\text{э} - \omega_0; \qquad (15)$$

$$\omega_i = d\delta_i/dt; \; T_{J\text{э}} = \sum_i^n T_{Ji}; \; \omega_\text{э} = \sum_i^n T_{Ji}\omega_i/T_{J\text{э}}.$$

Подстановка выражений (13) и (14) в (11) дает возможность записать в совокупности и раздельно два показателя, характеризующие интенсивность затухания переходного электромеханического процесса (критерии):

$$I_\omega = \sum_i^n \int_0^\infty T_{Ji}\omega_{i\text{э}}^2\,dt = \min; \qquad (16)$$

$$I_f = \int_0^\infty T_{J\text{э}}\Delta\omega_\text{э}^2\,dt = \min, \qquad (17)$$

где $\Delta\omega_\text{э}=\omega_\text{э}-\omega_0$.

Критерий (16) является показателем наименьшей колебательности роторов синхронных машин ЭЭС относительно траектории их движения как целого.

Если переходный процесс затухает, то зависимость $I_\omega$ от времени графически отображается кривой, асимптотически приближающейся к некоторой параллельной оси абсцисс прямой (кривая *1* на рис. 2).

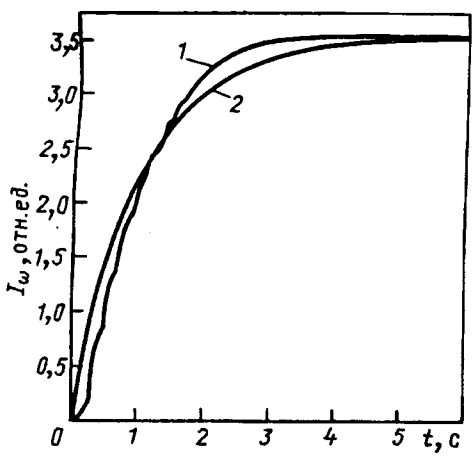



**Рис. 2.** Зависимость $I_\omega$:
*1* — расчетная; *2* — аппроксимированная

Показатель $I_f$ характеризует колебательность ЭЭС при рассмотрении ее движения как целого относительно синхронно вращающейся оси, т.е. отклонения среднего значения частоты ЭЭС.

Из анализа кривой *1* на рис. 2 нетрудно прийти к выводу, что $I_\omega(t)$ изменяется по закону, близкому к экспериментальному.

В общем случае характеристика $I_\omega(t)$ может лишь на отдельных участках совпадать с экспонентой. Так как подынтегральное выражение (16) является квадратичной формой от скоростей $\omega_{i\text{э}}$ ($i=1,...,n$), то, например, для двухмашинной ЭЭС при взаимных качаниях роторов генераторов в определенные моменты времени оно принимает и нулевые значения. В эти моменты времени приращения интеграла $I_\omega$ оказываются равными нулю, чему соответствует появление на кривой $I_\omega(t)$ участков, параллельных оси абсцисс в моменты времени, когда $\omega_{i\text{э}}=0$.

Однако с увеличением числа синхронных машин в ЭЭС флуктуация кривой $I_\omega(t)$ относительно экспоненты уменьшается.

Так, для ЭЭС с числом генераторов $n=6$ флуктуация кривой $I_\omega(t)$ (кривая *1* на рис. 2) уже не имеет слишком ярко выраженного характера. Изменение углов $\delta_{i\text{э}}$ во времени на рис. 3 для рассматриваемого случая свидетельствует об интенсивности затухания переходного процесса и соответствует характеру изменения кривой $I_\omega$ на рис. 2.

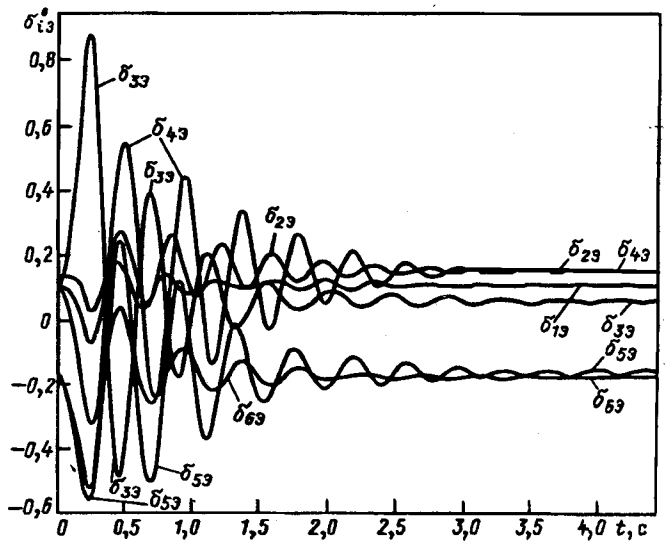



**Рис. 3.** Изменение углов $\delta_{i\text{э}}$ во времени

На рис. 4,*а*, *б* для измененных условий (не учитывается действие АРВ на генераторах) представлены соответственно графики изменения углов $\delta_{i\text{э}}$ для всех генераторов ЭЭС и изменение интегрального показателя $I_\omega$ в функции времени $t$. Из рассмотрения кривых $\delta_{i\text{э}}(t)$ видно, что переходный процесс является самораскачивающимся. Об этом же свидетельствует и вид характеристики $I_\omega(t)$ — не наблюдается тенденция к ее асимптотическому приближению к прямой, параллельной оси абсцисс.

Проведенный анализ подтверждает связь между видом характеристики $I_\omega(t)$ и качеством переходного процесса в ЭЭС и указывает на возможность использования показателя $I_\omega$ для оценки качества переходного процесса в сложной ЭЭС.

При определении кривых $\delta_{i\text{э}}(t)$ использовалось известное выражение [7]:

$$\delta_{i\text{э}} = \delta_i - \sum_i^n T_{Ji}\delta_i/T_{J\text{э}}.$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

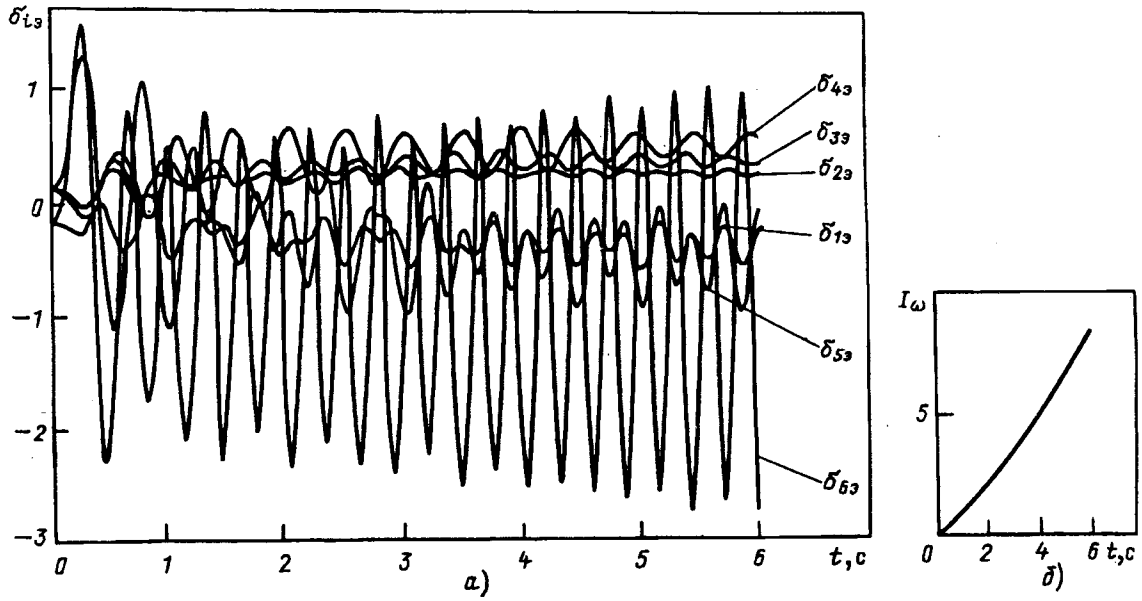



**Рис. 4.** Изменение во времени при отключенном АРВ: *а* — углов $\delta_{iэ}$; *б* — показателя $I_\omega$

Исходя из изложенного, аппроксимируем зависимость $I_\omega(t)$ экспонентой в виде

$$I_\omega = (I_\omega^{\max} - I_\omega^0)(1 - e^{-t/T_э}), \qquad (18)$$

где $T_э$ — эквивалентная постоянная; $I_\omega^{\max}$ и $I_\omega^0$ — соответственно наибольшее конечное и начальное значения показателя $I_\omega$ (при $t=\infty$ и $t=t_0=0$).

Отсюда, учитывая, что $I_\omega^0=0$, определяем

$$e^{-t/T_э} = 1 - I_\omega/I_\omega^{\max}.$$

Следовательно,

$$T_э = -t/\ln(1 - I_\omega/I_\omega^{\max}). \qquad (19)$$

Аппроксимация зависимости $I_\omega(t)$ в виде экспоненты (18) означает, что переходный процесс с точки зрения взаимных качаний роторов генераторов ЭЭС можно рассматривать как соответствующий по математическому описанию процессу в инерционном типовом звене при подаче на его вход сигнала $x_1$ в виде скачка. Действительно, такое звено, называемое также позиционным апериодическим звеном 1-го порядка, описывается дифференциальным уравнением вида [8]:

$$T\frac{dx_2}{dt} + x_2 = kx_1, \qquad (20)$$

где $T$ — постоянная времени звена.

Выходной сигнал $x_2$ изменяется по экспоненциальному закону:

$$x_2 = kx_1(1 - e^{-t/T}).$$

Теоретически такой переходный процесс может длиться бесконечно продолжительное время. На практике для такого звена под временем затухания переходного процесса понимается наименьший промежуток времени $t_{зат}$, по истечении которого выполняется неравенство $kx_1 - x_2 \leqslant \varepsilon$, где $\varepsilon$ — некоторое заданное положительное число, обычно принимается равным $(0{,}01 \div 0{,}05)k$.

Более точное аппроксимирование может быть достигнуто при математическом описании позиционного апериодического звена 2-го рода дифференциальным уравнением 2-го порядка:

$$T_1^2\frac{d^2x_2}{dt^2} + T_2\frac{dx_2}{dt} + x_2 = kx_1. \qquad (21)$$

При выполнении соотношения $\xi = T_2/2T_1 < 1$ выходной сигнал при подаче на вход сигнала $x_1$ в виде скачка изменяется по гармоническому закону, т. е. звено с описанием в виде (21) проявляет себя как колебательное.

При $\xi > 1$ получаемое на основе (21) характеристическое уравнение

$$T_1^2p^2 + T_2p + 1 = 0 \qquad (22)$$

имеет действительные корни.

В этом случае звено перестает быть колебательным и математическое описание его передаточной функции можно представить в виде

$$W(p) = \frac{k}{(1 + pT_3)(1 + pT_4)},$$

причем, постоянные времени $T_3$ и $T_4$ определяются по формуле

$$T_{3,4} = \frac{1}{2}(T_2 \pm \sqrt{T_2^2 - 4T_1^2}). \qquad (23)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

В этом случае уравнение (22) имеет действительные отрицательные корни. Это означает, что при $\xi \geqslant 1$ позиционное апериодическое звено 2-го рода эквивалентно двум последовательно соединенным инерционным звеньям с постоянными времени, соответственно $T_3$ и $T_4$, определяемым по (23).

Однако для оценки качества переходного процесса в сложной ЭЭС столь высокая точность аппроксимации кривой $I_\omega(t)$ с определением двух постоянных времени $T_3$ и $T_4$ не требуется. Достаточно использовать такой показатель, как эквивалентная постоянная времени затухания переходного процесса $T_э$, определяемая при упрощенной аппроксимации экспонентой $I_\omega(t)$, отвечающей дифференциальному уравнению первого порядка для инерционного звена (20).

Значение постоянной времени $T_э$ и отвечающее установившемуся режиму (при $t \to \infty$) значение $I_\omega^{max}$ могут быть использованы для оценки качества переходного процесса с учетом действующих в ЭЭС различного рода регулирующих устройств и других средств автоматики.

Представленные на рис. 2 характеристики $I_\omega(t)$ построены для сравнения при оценке качества переходного процесса в сложной ЭЭС, обусловленного трехфазным КЗ. Кривая *1* построена по результатам расчета переходного процесса в сложной системе с учетом действия АРВ и АРТ на всех агрегатах. Кривая *2* построена по уравнению (18), в котором значению $T_э$ принимается по методу наименьших квадратов равным 1,7 с.

На основе сопоставления кривых *1* и *2* можно заключить, что для определения постоянной $T_э$ и оценки качества затухания переходного процесса можно ограничиться аппроксимацией кривой $I_\omega(t)$ апериодическим звеном 1-го порядка.

Для оценки интенсивности затухания переходного процесса достаточно знать значение $I_\omega^{max}$ для кривой $I_\omega(t)$ и значение $T_э$. Если при вариации параметров для разных условий (*a*) и (*b*) оказывается, что $I_\omega^{max}(a)=I_\omega^{max}(b)$, то оценить наилучшую интенсивность затухания переходного процесса можно сопоставлением постоянных времени $T_э(a)$ и $T_э(b)$.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 1985.
2. **Зеленохат Н.И.** Критерии оптимальности управления переходными электромеханическими процессами в сложной электроэнергетической системе. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1972, № 5.
3. **Литкенс И.В., Пуго В.И.** Колебательные свойства электрических систем. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. **Яворский Б.М., Детлаф А.А.** Справочник по физике. — М.: Наука, 1964.
5. **Ковач К.П., Рац И.** Переходные процессы в машинах переменного тока. — М.: ГЭИ, 1963.
6. **Хачатуров А.А.** Несинхронные включения и ресинхронизация в энергосистемах. — М.: Энергия, 1977.
7. **Зеленохат Н.И.** Эквивалентное представление характеристик переходного электромеханического процесса в сложной системе. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1969, № 4.
8. **Бессекерский В.А., Попов Е.П.** Теория автоматического регулирования. — М.: Наука, 1970.


*[07.09.95]*

*Авторы:* ***Зеленохат Николай Иосифович*** *окончил гидротехнический факультет Ленинградского политехнического института в 1960 г. В 1990 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Разработка теоретических основ и методики исследования режимов гибкой межсистемной связи с управляемой электромеханической вставкой» в Московском энергетическом институте (МЭИ). Профессор кафедры электроэнергетических систем МЭИ.*

***Баргути Халед Самих*** *окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1992 г. В 1995 г. защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию на тему «Разработка алгоритмов и анализ эффективности управления средствами стабилизации режима электроэнергетической системы (Сибири) после больших возмущений». Преподаватель Берзитского университета (Израиль).*

***Левченко Сергей Александрович*** *окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1995 г. Аспирант на кафедре электроэнергетических систем МЭИ.*

**ВНИМАНИЮ РУКОВОДИТЕЛЕЙ ПРЕДПРИЯТИЙ, ОБЪЕДИНЕНИЙ, НИИ и КБ, ВУЗОВ**

Редакция журнала «Электричество» предлагает услуги по подготовке и выпуску на договорных условиях специальных (тематических) номеров журнала

**Справки по телефону 928-88-69**

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# Экономичное распределение мощности между электростанциями энергосистемы

КУЗНЕЦОВ Н.Д., КУЗНЕЦОВ В.Н.

*Приводится описание предлагаемого точного метода экономичного распределения, основанного на совместном решении систем линейных уравнений, одним из которых моделируется ограничение по выработке заданного количества электроэнергии на ГЭС. Показано, что для решения приведенной проблемы применение задачи Куна—Таккера освобождает полученные результаты от дальнейшей их проверки на оптимальность.*

Ключевые слова: *энергосистема, электростанция, экономичное распределение мощности, расчет*

*The precise numerical method, worked out by the authors, of economic power distribution between the electric power plants of the electrical power system owing to the set energy output at the hydro-electric power stations is described.*

Key words: *electrical power system, power plant, power distribution, calculation*

Известно, что условия экономичного распределения мощности между электростанциями (ЭС) энергосистемы вытекают из совместного решения нескольких систем уравнений, функционально описывающих исследуемую оптимизационную задачу. К характеристикам объекта этой задачи относятся: целевая функция затрат энергоносителя и функции-ограничения, задаваемые в форме равенств и неравенств.

При наличии в совместно решаемых системах уравнений хотя бы одного условия, описываемого нелинейной функцией, решение задачи по поиску искомых значений мощностей ЭС не является однозначным. В рассматриваемой задаче таким условием являются нелинейные функции-ограничения по заданным расходам воды на ГЭС. В связи с этим полученные результаты решения должны проверяться на соответствие условиям достижения глобального минимума.

Проверке на оптимальность должны были бы подвергаться и результаты, получаемые по широко внедренным в энергосистемах программным средствам ВНИИЭ — ВЦ ГТУ и СибНИИЭ, в которых в качестве расчетного модуля задействован градиентный метод Ньютона—Рафсона, так как здесь решение может сходиться не к глобальному, а к одному из локальных оптимумов.

Для рассматриваемой оптимизационной задачи критерием оптимальности могут являться условия Куна—Таккера, которые предусматривают задание целевой функции в виде выпуклой, функций-ограничений в форме неравенств — вогнутыми функциями, функций-ограничений в форме равенств — линейными функциями.

Так как в решаемой задаче функция-ограничение на заданный расход воды на ГЭС является квадратичной, ее наличие приводит к нарушению достаточности условий оптимальности Куна—Таккера первого порядка. По этой причине для анализа результатов на оптимальность необходимо применять условия оптимальности второго порядка, основанные на производных второго порядка, что, как показывает предварительный анализ, связано с большими затратами машинного времени, соизмеримыми с временем работы основного комплекса программ. Применение этого критерия по указанной причине становится нецелесообразным.

Избежать применения условий оптимальности второго порядка удается заменой ограничений по сработке заданного расхода воды на ГЭС на пропорциональные им величины — заданные выработки электроэнергии, являющиеся линейными ограничениями.

Кроме того, целесообразно каждую тепловую ЭС (ТЭС), имеющую характеристику относительного прироста (ХОП) топлива в виде кусочно-линейной функции с разрывами непрерывности, представить несколькими фиктивными ЭС с ХОП в виде гладкой кривой линейной зависимости.

Каждая ГЭС также должна быть представлена несколькими фиктивными ЭС ХОП подобного вида. После проведения указанных операций найдем условия, которым должен удовлетворять оптимальный режим энергосистемы по суммарным затратам энергоносителя.

Условия экономичного распределения мощности между ЭС могут быть получены в результате минимизации следующей целевой функции:

$$B_{\Sigma}^{[t_1, t_T]} = \sum_{\xi=1}^{T} \sum_{i=1}^{n} B_i^{t_\xi} + \sum_{\xi=1}^{T} \sum_{j=1}^{m} Э_j Q_j^{t_\xi}, \qquad (1)$$

состоящей из двух составляющих:

$\sum_{\xi=1}^{T} \sum_{i=1}^{n} B_i^{t_\xi}$ условного расхода топлива на $n$ ЭС,

$\sum_{\xi=1}^{T} \sum_{j=1}^{m} Э_j Q_j^{t_\xi}$ приведенного к условному топливу расхода воды на $m$ ГЭС.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Коэффициент $Э_j$ (пересчет воды в топливо) в соответствии с [2] рассчитывается заранее для каждой ГЭС за полный ее цикл регулирования водотока.

Достижение минимума целевой функции (1) должно быть осуществлено с соблюдением следующих ограничений.

1. Поддержание баланса активной мощности энергосистемы за каждый момент времени $t_\xi$:

$$H_p^{t_\xi}=P_н^{t_\xi}+\pi^{t_\xi}-\sum_{i=1}^{n}P_i^{t_\xi}-\sum_{j=1}^{m}P_j^{t_\xi}=0,\ \xi=1,2,...,T. \quad (2)$$

2. Непревышение пределов изменения мощности на ТЭС как по нижнему $P_{i\,\min}$, так и по верхнему $P_{i\,\max}$ пределам:

$$g_{i\,\min}^{t_\xi}=P_i^{t_\xi}-P_{i\,\min}^{t_\xi}\geqslant 0,\ i=1,2,...,n;\ \xi=1,2,...,T; \quad (3)$$

$$g_{i\,\max}^{t_\xi}=P_{i\,\max}^{t_\xi}-P_i^{t_\xi}\geqslant 0,\ i=1,2,...,n;\ \xi=1,2,...,T. \quad (4)$$

3. Непревышение соответствующих пределов изменения мощности на ГЭС:

$$g_{j\,\min}^{t_\xi}=P_j^{t_\xi}-P_{j\,\min}^{t_\xi}\geqslant 0,\ j=1,2,...,m;\ \xi=1,2,...,T; \quad (5)$$

$$g_{j\,\max}^{t_\xi}=P_{j\,\max}^{t_\xi}-P_j^{t_\xi}\geqslant 0,\ j=1,2,...,m;\ \xi=1,2,...,T. \quad (6)$$

4. Выработка электроэнергии по каждой ГЭС в течение отрезка времени $[t_1, t_T]$ должна соответствовать заданному значению, т. е. должны выполняться следующие равенства:

$$W_j^{[t_1,t_T]}-W_{j\,зад}=0,\ j=1,2,...,m;$$

$$W_j^{[t_1,t_T]}=\sum_{j=1}^{m}P_j^{t_\xi}-W_{j\,зад}=0,\ j=1,2,...,m. \quad (7)$$

Минимум функции (1) при приведенных ограничениях (2)÷(7) может быть достигнут при выполнении необходимых и достаточных условий Куна—Таккера [1]. При этих условиях искомые значения неизвестных типа $P_i^{t_\xi}$, $P_j^{t_\xi}$, $V_p^{t_\xi}$, $\gamma_{i\,\min}^{t_\xi}$, $\gamma_{i\,\max}^{t_\xi}$, $\gamma_{j\,\min}^{t_\xi}$, $\gamma_{j\,\max}^{t_\xi}$, $\lambda_j$ должны удовлетворять следующей системе уравнений:

$$\frac{\partial B_\Sigma^{[t_1,t_T]}}{\partial P_i^{t_\xi}}-\sum_{i=1}^{n}\sum_{\xi=1}^{T}\gamma_{i\,\min}^{t_\xi}\frac{\partial g_{i\,\min}^{t_\xi}}{\partial P_i^{t_\xi}}-\sum_{i=1}^{n}\sum_{\xi=1}^{T}\gamma_{i\,\max}^{t_\xi}\frac{\partial g_{i\,\max}^{t_\xi}}{\partial P_i^{t_\xi}}-$$

$$-\sum_{\xi=1}^{T}V_p^{t_\xi}\frac{\partial H_p^{t_\xi}}{\partial P_i^{t_\xi}}=0,\ i=1,2,...,n;\ \xi=1,2,...,T; \quad (8)$$

$$\frac{\partial B_\Sigma^{[t_1,t_T]}}{\partial P_j^{t_\xi}}-\sum_{j=1}^{m}\sum_{\xi=1}^{T}\gamma_{j\,\min}^{t_\xi}\frac{\partial g_{j\,\min}^{t_\xi}}{\partial P_j^{t_\xi}}-\sum_{j=1}^{m}\sum_{\xi=1}^{T}\gamma_{j\,\max}^{t_\xi}\frac{\partial g_{j\,\max}^{t_\xi}}{\partial P_j^{t_\xi}}-$$

$$-\sum_{j=1}^{m}\sum_{\xi=1}^{T}\lambda_j\frac{\partial P_j^{t_\xi}}{\partial P_j^{t_\xi}}-\sum_{\xi=1}^{T}V_p^{t_\xi}\frac{\partial H_p^{t_\xi}}{\partial P_j^{t_\xi}}=0,$$

$$i=1,2,...,n;\ \xi=1,2,...,T; \quad (9)$$

$$g_{i\,\min}^{t_\xi}\gamma_{i\,\min}^{t_\xi}=\gamma_{i\,\min}^{t_\xi}(P_i^{t_\xi}-P_{i\,\min}^{t_\xi})=0,$$

$$i=1,2,...,n;\quad \xi=1,2,...,T; \quad (10)$$

$$g_{i\,\max}^{t_\xi}\gamma_{i\,\max}^{t_\xi}=\gamma_{i\,\max}^{t_\xi}(P_{i\,\max}^{t_\xi}-P_i^{t_\xi})=0,$$

$$i=1,2,...,n;\quad \xi=1,2,...,T; \quad (11)$$

$$g_{j\,\min}^{t_\xi}\gamma_{j\,\min}^{t_\xi}=\gamma_{j\,\min}^{t_\xi}(P_j^{t_\xi}-P_{j\,\min}^{t_\xi})=0,$$

$$i=1,2,...,m;\quad \xi=1,2,...,T; \quad (12)$$

$$g_{j\,\max}^{t_\xi}\gamma_{j\,\max}^{t_\xi}=\gamma_{j\,\max}^{t_\xi}(P_{j\,\max}^{t_\xi}-P_j^{t_\xi})=0,$$

$$i=1,2,...,m;\quad \xi=1,2,...,T; \quad (13)$$

при выполнении условий неотрицательности:

$$g_{i\,\min}^{t_\xi}=P_i^{t_\xi}-P_{i\,\min}^{t_\xi}\geqslant 0;\ g_{i\,\max}^{t_\xi}=P_{i\,\max}^{t_\xi}-P_i^{t_\xi}\geqslant 0,$$

$$g_{j\,\min}^{t_\xi}=P_j^{t_\xi}-P_{j\,\min}^{t_\xi}\geqslant 0;\ g_{j\,\max}^{t_\xi}=P_{j\,\max}^{t_\xi}-P_j^{t_\xi}\geqslant 0,$$

$$i=1,2,...,n;\ j=1,2,...,m;\ \xi=1,2,...,T; \quad (14)$$

$$\gamma_{i\,\min}^{t_\xi}\geqslant 0,\ \gamma_{i\,\max}^{t_\xi}\geqslant 0,\ \gamma_{j\,\min}^{t_\xi}\geqslant 0,\ \gamma_{j\,\max}^{t_\xi}\geqslant 0. \quad (15)$$

После взятия частных производных системы уравнений (8) и (9) принимают вид:

$$b_i^{t_\xi}-\gamma_{i\,\min}^{t_\xi}+\gamma_{i\,\max}^{t_\xi}+V_p^{t_\xi}(1-\sigma_i^{t_\xi})=0,$$

$$i=1,2,...,n;\quad \xi=1,2,...,T; \quad (16)$$

$$Э_j g_j^{t_\xi}-\gamma_{j\,\min}^{t_\xi}+\gamma_{j\,\max}^{t_\xi}-\lambda_j+V_p^{t_\xi}(1-\sigma_j^{t_\xi})=0,$$

$$j=1,2,...,m;\quad \xi=1,2,...,T; \quad (17)$$

где дополнительно введены параметры: $b_i^{t_\xi}$ — относительный прирост расхода топлива на $i$-й ТЭС в момент времени $t_\xi$; $q_j^{t_\xi}$ — то же воды на ГЭС; $\sigma_i^{t_\xi}$, $\sigma_j^{t_\xi}$ — соответственно относительные приросты потерь мощности в сети энергосистемы для $i$-й ТЭС и $j$-й ГЭС за момент времени $t_\xi$.

Пренебрегая в первом приближении изменением потерь мощности в сети ($\sigma_i^{t_\xi}=0$, $\sigma_j^{t_\xi}=0$), а также вводя значения относительных приростов ТЭС и ГЭС в виде линейных зависимостей вида

$$b_i^{t_\xi}=a_i^{t_\xi}+c_i^{t_\xi}P_i^{t_\xi},\ q_j^{t_\xi}=q_{j0}^{t_\xi}+k_j^{t_\xi}P_j^{t_\xi}$$

из выражений (16) и (17) нетрудно получить

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

условия экономичного распределения мощности:

$$a_i^{t_\xi} + c_i^{t_\xi} P_i^{t_\xi} - \gamma_{i\min}^{t_\xi} + \gamma_{i\max}^{t_\xi} = Э_j q_{j0}^{t_\xi} + Э_j k_j^{t_\xi} P_j^{t_\xi} -$$

$$- \gamma_{j\min}^{t_\xi} + \gamma_{j\max}^{t_\xi} - \lambda_j = -V_p^{t_\xi},$$

$$i = 1, 2, ..., n;\ j = 1, 2, ..., m;\ \xi = 1, 2, ..., T. \quad (18)$$

Условия (18) вместе с равенствами (2)÷(7) и (10)÷(13) хотя и образуют число тождеств, равное числу неизвестных, однако эту систему разрешить не представляется возможным из-за наличия связей, описываемых уравнениями, имеющими следующую структуру:

$$\gamma_i g_i(P_i) = 0; \quad \gamma_j g_j(P_j) = 0.$$

Однако указанной трудности удается избежать, используя процедуру последовательного уточнения результатов расчета в процессе итеративного решения задачи. Дело заключается в том, что в каждом из выполняемых расчетов снимаются ограничения, накладываемые на изменение независимых переменных, и производится закрепление предельных значений мощностей тех ЭС, которые вышли за допустимые границы в предшествующем расчете. Раскрепление ограничений реализуется приравниванием нулю постоянных типа $\gamma$, т. е. выполнением равенств:

$$\gamma_{i\min}^{t_\xi} = \gamma_{i\max}^{t_\xi} = \gamma_{j\min}^{t_\xi} = \gamma_{j\max}^{t_\xi} = 0.$$

Условия экономичного распределения (18) в данном случае дополнительно упрощаются до выражения

$$a_i^{t_\xi} + c_i^{t_\xi} P_i^{t_\xi} = Э_j q_{j0}^{t_\xi} + Э_j k_j^{t_\xi} P_j^{t_\xi} - \lambda_j = -V_p^{t_\xi},$$

$$i=1, 2, ..., n;\ j=1, 2, ..., m;\ \xi=1, 2, ..., T. \quad (19)$$

Из соотношения (19) следует, что мощность ТЭС в оптимальном режиме должна быть равна

$$P_i^{t_\xi} = \frac{-V_p^{t_\xi} - a_i^{t_\xi}}{c_i^{t_\xi}}, \quad (20)$$

а мощность ГЭС — определяться зависимостью

$$P_j^{t_\xi} = \frac{-V_p^{t_\xi} + \lambda_j - Э_j q_{j0}^{t_\xi}}{Э_j k_j^{t_\xi}}. \quad (21)$$

При суммировании мощностей по (21) за период времени $T$ получаем выражение связи между заданной выработкой электроэнергии на ГЭС, ее параметрами ХОП, коэффициентом Лагранжа $\lambda_j$ и системным относительным приростом $V_p^{t_\xi}$:

$$\sum_{\xi=1}^{T} P_j^{t_\xi} = W_{j\,зад} = \sum_{\xi=1}^{T} \frac{-V_p^{t_\xi} + \lambda_j - Э_j q_{j0}^{t_\xi}}{Э_j k_j^{t_\xi}}. \quad (22)$$

Из выражения (22) определяем после некоторых преобразований значение $\lambda_j$:

$$\lambda_j = \frac{1}{\sum_{\xi=1}^{T} \frac{1}{Э_j k_j^{t_\xi}}} \left( W_{j\,зад} + \sum_{\xi=1}^{T} \frac{Э_j q_{j0}^{t_\xi}}{Э_j k_j^{t_\xi}} + \sum_{\xi=1}^{T} \frac{V_p^{t_\xi}}{Э_j k_j^{t_\xi}} \right).$$

Подставляя (22) в (21), несложно получить выражение для мощности $j$-й ГЭС в момент времени $t_\xi$:

$$P_j^{t_\xi} = \frac{1}{Э_j k_j^{t_\xi} \sum_{\xi=1}^{T} \frac{1}{Э_j k_j^{t_\xi}}} \left( W_{j\,зад} + \sum_{\xi=1}^{T} \frac{Э_j q_{j0}^{t_\xi}}{Э_j k_j^{t_\xi}} + \sum_{\xi=1}^{T} \frac{V_p^{t_\xi}}{Э_j k_j^{t_\xi}} \right) -$$

$$- \frac{1}{Э_j k_j^{t_\xi}} (Э_j q_{j0}^{t_\xi} + V_p^{t_\xi}),\ j=1, 2, ..., m;\ \xi=1, 2, ..., T. \quad (23)$$

Подставляя далее (20) и (21) в (2), запишем следующее выражение для определения $V_p^{t_\xi}$:

$$-A^{t_\xi} V_p^{t_\xi} + A_1^{t_\xi} V_p^{t_1} + A_2^{t_2} V_p^{t_\xi} + ... + A_T^{t_\xi} V_p^{t_T} = B_н^{t_\xi},$$

$$\xi = 1, 2, ..., T, \quad (24)$$

где

$$A = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{c_i^{t_\xi}} + \sum_{j=1}^{m} \frac{1}{Э_j k_j^{t_\xi}};\quad A_1^{t_\xi} = \sum_{j=1}^{m} \frac{\frac{1}{Э_j k_j^{t_1}}}{Э_j k_j^{t_\xi} \sum_{\xi=1}^{T} \frac{1}{Э_j k_j^{t_\xi}}};$$

$$A_2^{t_\xi} = \sum_{j=1}^{m} \frac{\frac{1}{Э_j k_j^{t_2}}}{Э_j k_j^{t_\xi} \sum_{\xi=1}^{T} \frac{1}{Э_j k_j^{t_\xi}}};\ ...\ A_T^{t_\xi} = \sum_{j=1}^{m} \frac{\frac{1}{Э_j k_j^{t_T}}}{Э_j k_j^{t_\xi} \sum_{\xi=1}^{T} \frac{1}{Э_j k_j^{t_\xi}}};$$

$$B_н^{t_\xi} = P_н^{t_\xi} + \sum_{i=1}^{n} \frac{a_i^{t_\xi}}{c_i^{t_\xi}} - \sum_{j=1}^{m} \frac{W_{j\,зад}}{Э_j k_j^{t_\xi} \sum_{\xi=1}^{T} \frac{1}{Э_j k_j^{t_\xi}}} + \sum_{j=1}^{m} \frac{Э_j q_{j0}^{t_\xi}}{Э_j k_j^{t_\xi}} -$$

$$- \sum_{j=1}^{m} \frac{\sum_{\xi=1}^{T} \frac{Э_j q_{j0}^{t_\xi}}{Э_j k_j^{t_\xi}}}{Э_j k_j^{t_\xi} \sum_{\xi=1}^{T} \frac{1}{Э_j k_j^{t_\xi}}}.$$

Система уравнений (24) решается достаточно просто, например методом исключения неизвестных Гаусса [3]. Подставляя найденные в результате решения системы уравнений (24) значения $V_p^{t_\xi}$ в (20) и (23), определим искомые значения мощностей ТЭС и ГЭС за каждый момент времени $t_\xi$.

Часовые мощности реальных ТЭС и ГЭС, по-видимому, будут равны сумме соответствующих мощностей фиктивных ЭС за аналогичные часы. Так мощность ТЭС с ХОП, приведенной на рис. 1,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

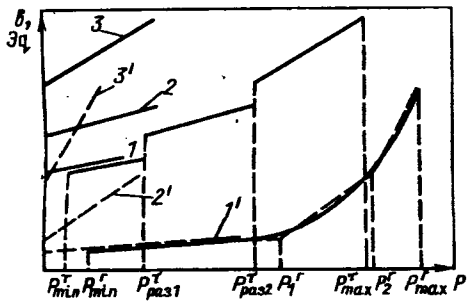



**Рис. 1.** Характеристика относительного прироста ТЭС (представлена тремя линейными участками):
*1* — $b_{ф1}=a_{10}+c_1P_1^T$ при $0\leq P_1^T\leq P_{раз1}^T-P_{min}^T$; *2* — $b_{ф2}=a_{20}+c_2P_2^T$ при $0\leq P_2^T\leq P_{раз2}^T-P_{раз1}^T$; *3* — $b_{ф3}=a_{30}+c_3P_3^T$ при $0\leq P_3^T\leq P_{max}^T-P_{раз2}^T$; *1'* — $Эq_{ф1}=Эq_{10}+Эk_1P_1^Г$ при $0\leq P_1^Г-P_{min}^Г$; *2'* — $Эq_{ф2}=Эq_{20}+Эk_2P_2^Г$ при $0\leq P_2^Г-P_1^Г$; *3'* — $Эq_{ф3}=Эq_{30}+Эk_3P_3^Г$

характеризующейся тремя ее линейными участками с диапазоном изменения мощности каждого:

$$P_{min}-P_{раз1},\ P_{раз1}-P_{раз2},\ P_{раз2}-P_{max},$$

представлена в расчете тремя фиктивными ЭС, имеющими ХОП:

$$b_1=a_{10}'+c_1P_1 \quad при \quad 0\leq P_1\leq P_{раз1}-P_{min2}$$

$$b_2=a_{20}+c_2P_2 \quad при \quad 0\leq P_2\leq P_{раз2}-P_{раз1},$$

$$b_3=a_{30}+c_3P_3 \quad при \quad 0\leq P_3\leq P_{max}-P_{раз2},$$

где $a_{10}'=a_{10}+c_1P_{min}$, и будет равна

$$P_{ТЭС}=P_1+P_2+P_3.$$

Как указывалось ранее, приведенные расчетные выражения предполагают неограниченное изменение мощности ЭС. В связи с раскреплением ограничений по мощности ЭС после проведения уже первого расчета среди мощностей ЭС окажутся такие, которые не будут соответствовать допустимому диапазону их изменения, превысив нижний или верхний пределы. Поэтому после проведения расчета полученные значения мощностей всех ЭС за все моменты времени должны быть подвергнуты анализу на допустимые пределы изменения.

При обнаружении недогрузившихся или перегрузившихся ЭС они фиксируются на соответствующих предельных значениях и в последующих расчетах моделируются нулевыми мощностями. Это достигается введением в новый расчет ХОП, у которых свободные члены равны нулю ($a=0$ для ТЭС и $q_0=0$ для ГЭС), а коэффициенты при мощностях ($c$ для ТЭС и $k$ для ГЭС) — заведомо большие числа.

Перед проведением нового расчета необходимо также скорректировать на фиксируемые предельные значения мощностей графики потребления и заданные выработки электроэнергии по вышедшим за предельные мощности ЭС. Мощность потребления энергосистемы и заданная выработка электроэнергии должны быть уменьшены на эти предельные мощности.

После проведения повторного расчета вновь полученные мощности опять анализируются, в результате чего вновь производится закрепление на предельных значениях новых, вышедших из допустимых диапазонов изменений мощностей, ЭС. Затем производится корректировка исходных данных для проведения следующего расчета.

Описанный расчетный процесс повторяется до тех пор, пока не окажется ни одной ЭС, мощность которой не соответствует заданным пределам. Этот последний расчет и будет являться концом решения задачи.

В дополнение к изложенному необходимо отметить некоторые особенности моделирования ЭС с заданной выработкой электроэнергии. Так, в связи с тем, что ХОП таких ЭС (в основном это ГЭС) состоит из нескольких (двух—трех) линейных участков, каждому из которых поставлена в соответствие фиктивная ЭС со своим допустимым диапазоном изменения мощности, но с общим для всех этих фиктивных ЭС ограничением по выработке заданного количества электроэнергии, возникает вопрос, каким образом учитывать их в процессе решения задачи.

В предлагаемом алгоритме предусмотрено введение в расчет сначала первой из фиктивных ЭС со значением заданной выработки электроэнергии в целом по ЭС.

Если в результате выполнения первого расчета по этой фиктивной ЭС не наступил предел по максимальной ее мощности, то при проведении второго расчета эта ЭС опять замещается первой фиктивной ЭС с прежней ХОП и прежней заданной выработкой электроэнергии. Если же мощность первой фиктивной ЭС оказалась больше предельно допустимой, то во второй расчет эта ЭС вводится второй фиктивной ЭС с соответствующей ей ХОП и пределами изменения мощности.

Вторая фиктивная ЭС вводится в расчет с скорректированной выработкой электроэнергии, равной разности между заданной мощностью первой фиктивной ЭС, зафиксированной на предельном значении после проведения предшествующего расчета.

По приведенному алгоритму последовательно включаются в расчет новые фиктивные ЭС, если выход предшествующих фиктивных ЭС на предельные значения мощности не исчерпал возможности по первоначально заданной выработке электроэнергии.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

| Номер расчета | Экономичное распределение мощности ($n=1$, $m=2$, $T=3$) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ТЭС-1 $b=a+cP_{T1}$ $a=0{,}13$; $c=0{,}001$ $P_{\min}=150$ МВт, $P_{\max}=420$ МВт | | | ГЭС-1 $q_1=q_{10}+k_1P_{г1}$ $P_{г1\,\min}=80$ МВт; $P_{г1\,\max}=365$ МВт | | | | | | ГЭС-2 $q_2=q_{20}+k_2P_{г2}$ $P_{г2\,\min}=200$ МВт; $P_{г2\,\max}=450$ МВт | | | | | | Энергосистема | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | Распределяемая мощность, МВт | | | Относительный прирост | | | Коэффициент Лагранжа | |
| | Мощность, МВт | | | $q_{10}$ | $k_1$ | Мощность, МВт | | | $W_{1зад}$, МВт·ч | $q_{20}$ | $k_2$ | Мощность, МВт | | | $W_{2зад}$, МВт·ч | | | | | | | | |
| | $P_{T1}^{t1}$ | $P_T^{t2}$ | $P_{T1}^{t3}$ | | | $P_{г1}^{t1}$ | $P_{г1}^{t2}$ | $P_{г1}^{t3}$ | | | | $P_{г2}^{t1}$ | $P_{г2}^{t2}$ | $P_{г2}^{t3}$ | | $P_н^{t1}$ | $P_н^{t2}$ | $P_н^{t3}$ | $-\nu_p^{t1}$ | $-\nu_p^{t2}$ | $-\nu_p^{t3}$ | $-\lambda_1$ | $-\lambda_2$ |
| Расчет №1 Исходные данные | | | | $q_{10}^{t1}=$ $q_{10}^{t2}=$ $q_{10}^{t3}=$ 0,2662 | $k_1^{t1}=$ $k_1^{t2}=$ $k_1^{t3}=$ $0{,}462\cdot10^{-3}$ | | | | 649 | $q_{20}^{t1}=$ $q_{20}^{t2}=$ $q_{20}^{t3}=$ 0,294 | $k_2^{t1}=$ $k_2^{t2}=$ $k_2^{t3}=$ $0{,}2785\cdot10^{-3}$ | | | | 956 | 490 | 780 | 1205 | | | | | |
| Результаты расчета | 240,5 | 283,8 | 346 | | | 108,7 | 201,5 | 338,3 | 649 | | | 140,5 | 294,7 | 520,8 | 956 | 490 | 780 | 1205 | 0,3705 | 0,4134 | 0,4765 | 0,0543 | 0,0377 |
| Фиксируемые $P$ и $W$ | | | | | | | | | | | | 200,0 | | 450,0 | 650 | 290 | 780 | 755 | | | | | |
| Расчет №2 Исходные данные | | | | $q_{10}^{t1}=$ $q_{10}^{t2}=$ $q_{10}^{t3}=$ 0,2662 | $k_1^{t1}=$ $k_1^{t2}=$ $k_1^{t3}=$ $0{,}462\cdot10^{-3}$ | | | | 649 | $q_{20}^{t1}=$ $=\infty$ $q_{20}^{t2}=$ 0,294 $q_{20}^{t3}=$ $=0$ | $k_2^{t1}=$ $=\infty$ $k_2^{t2}=$ $0{,}2785\cdot10^{-3}$ $k_2^{t3}=$ $=\infty$ | | | | 306 | 290 | 780 | 755 | | | | | |
| Результаты расчета | 220,0 | 281,5 | 368,5 | | | 70,0 | 192,5 | 386,5 | 649 | | | 0 | 306 | 0 | 306 | 290 | 780 | 755 | 0,3535 | 0,4070 | 0,4985 | 0,0538 | 0,0278 |
| Фиксируемые $P$ и $W$ | | | | | | 80,0 | | 365,0 | 445 | | | 200,0 | | 450,0 | 650,0 | 210 | 780 | 390 | | | | | |
| Расчет №3 Исходные данные | | | | $q_{10}^{t1}=$ $=0$ $q_{10}^{t2}=$ 0,2662 $q_{10}^{t3}=$ $=0$ | $k_1^{t1}=$ $=\infty$ $k_1^{t2}=$ $0{,}462\cdot10^{-3}$ $k_1^{t3}=$ $=\infty$ | 80,0 | | 365,0 | 204 | $q_{20}^{t1}=$ $=0$ $q_{20}^{t2}=$ 0,294 $q_{20}^{t3}=$ $=0$ | $k_2^{t1}=$ $=\infty$ $k_2^{t2}=$ $0{,}2785\cdot10^{-3}$ $k_2^{t3}=$ $=\infty$ | 200,0 | | 450,0 | 306 | 210 | 780 | 390 | | | | | |
| Результаты расчета | 210 | 270 | 390 | | | 0 | 204 | 0 | 204 | | | 0 | 306 | 0 | 306 | 210 | 780 | 390 | 0,34 | 0,40 | 0,52 | 0,04 | 0,02 |
| Итоговые данные решения задачи | 210 | 270 | 390 | | | 80 | 204 | 365 | 649 | | | 200 | 306 | 450 | 956 | 490 | 780 | 1205 | 0,34 | 0,40 | 0,52 | 0,04 | 0,02 |

Примечание. Характеристики относительного прироста $q_1=f(P_{г1})$ и $q_2=f(P_{г2})$ приведены к условному топливу через коэффициенты энергетической эффективности $Э_1$ и $Э_2$.

Для иллюстрации в качестве примера в таблице приведены результаты расчета экономичного распределения между тремя ЭС (одна ТЭС, две ГЭС) для трехчасового отрезка времени, выполненные по изложенному методу. Графическая интерпретация расчета приведена на рис. 2.

Анализируя результаты расчета, необходимо обратить внимание на быструю сходимость итерационного процесса по поиску решения, что обеспечивается возрастающим характером ХОП ГЭС и ТЭС.

Возрастающий характер ХОП ЭС также снимает сомнение в том, что закрепленная на предельном значении мощность ЭС в одном из предшествующих расчетов может «сойти» с этого предела в последующих расчетах. Справедливость указанного обстоятельства наглядно может быть продемонстрирована следующим образом.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

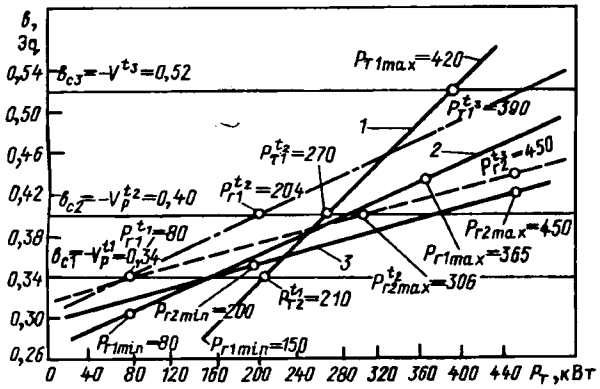



**Рис. 2.** Графическая интерпретация результатов расчета по экономичному распределению мощности:
*1* — $b_{T1}=0,13+0,001P_{T1}$; *2* — $Э_1 q_1=0,2662+0,000462P_{T1}$; *3* — $Э_2 q_2=0,294+0,0002785P_{T2}$

Предположим, что некоторая ЭС в предыдущем расчете оказалась перегруженной на некоторое значение мощности, в результате чего была зафиксирована на меньшее предельное значение. В следующем расчете, в силу необходимости сохранения баланса мощности в энергосистеме на это же значение окажутся догруженными другие ЭС, в результате чего системный относительный прирост расхода топлива — в сравнении с предшествующим расчетом увеличится. Мысленное раскрепление мощности ЭС, посаженной в предыдущем расчете на предельное значение, привело бы к еще большей ее перегрузке в связи с увеличившимся значением системного относительного прироста.

Эта тенденция к взятию на себя большей, чем предельное значение, мощности остается вплоть до проведения последнего расчета.

Аналогичными доводами объясняется устойчивость поддержания предельных мощностей тех ЭС, которые оказались зафиксированными на их максимально возможных значениях.

В заключение следует указать на очень важное свойство изложенного метода, заключающееся в том, что данный метод ведет к однозначному результату, доставляющему целевой функции глобальный минимум. Это обстоятельство непосредственно следует из применения для решения задачи условий оптимальности Куна—Таккера, исследующих целевую функцию выпуклого характера с линейного вида ограничениями и последовательным способом закрепления независимых переменных, достигших предельных значений.

**Вывод.** Изложенный в статье точный метод экономичного распределения мощности в отличие от применяющихся градиентных обеспечивает: безусловную надежность получения результата решения задачи независимо от вида целевой функции, количества ограничений (как в форме равенств, так и неравенств), а также начальных условий; однозначность решения; достижение глобального оптимума целевой функции; высокую точность решения задачи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Реклейтис Г., Рейвиндоан А., Рэгсдел К.** Оптимизация в технике. — М.: Мир, 1986.
2. **Горнштейн В.М.** Наивыгоднейшие режимы работы гидростанций в энергетических системах. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959.
3. **Курош А.Г.** Курс высшей алгебры. — М.: Изд-во Наука, 1971.

*[12.12.95]*

*Авторы:* ***Кузнецов Никандр Дмитриевич*** *окончил энергетический факультет Уральского индустриального института (УИИ) в 1949 г. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском политехническом институте по теме «Фазовый метод учета изменения потерь и мероприятия по их снижению в неоднородной сети энергосистемы». В настоящее время на пенсии.*

***Кузнецов Владимир Никандрович*** *окончил энергетический факультет Уральского политехнического института в 1982 г. Ведущий инженер по противоаварийной автоматике в системе «Тюменьэнерго».*

**Уважаемые авторы!**

Редакция публикует при каждой статье краткие биографические сведения об авторах. В связи с этим просим всех авторов при направлении статьи в редакцию сообщать 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

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# Влияние емкостной проводимости нулевой последовательности длинных линий на работу высокочастотных и дифференциальных защит

АЛЕКСЕЕВ В.Г., ЛЕВИУШ А.И.

*Приведена количественная оценка погрешности компенсации емкостных токов при отсутствии учета взаимоиндукции нулевой последовательности для воздушных линий, идущих в одном коридоре. Такая оценка позволяет определить область, в которой компенсация емкостных токов возможна без учета взаимоиндукции и, следовательно, возможно использование в высокочастотных защитах составляющей тока нулевой последовательности и полных токов для дифференциальных защит.*

Ключевые слова: *воздушные линии, защита, взаимоиндукция, компенсация емкостных токов*

*The paper presents a numerical estimation of a capacitive current compensation error without taking account of a zero sequence mutual inductance of parallel lines. Such an estimation allows to determine a domain in which a capacitive current compensation is possible without taking account of the mutual induction and therefore it is possible to use a sero-phase sequance current component in cauuier current protections and total currents in differential protections.*

Key words: *overhead lines, line protection, mutual inductance, capacitive current compensation*

Чувствительные дифференциально-фазные (ДЗУ), направленные и дифференциальные защиты (НЗ и ДЗ) длинных воздушных линий (ВЛ) невозможно выполнить без компенсации емкостных токов. При внешних КЗ значения емкостных токов сопоставимы или превосходят токи срабатывания защит, которые выбираются по условию обеспечения требуемой чувствительности. Например, для ВЛ 750 кВ длиной 400 км ток срабатывания направленной защиты с ВЧ-блокировкой составляет 150 А по обратной последовательности, тогда как емкостный ток линии достигает 750 А на фазу. В результате этого при отсутствии компенсации емкостные токи могут быть причиной излишних срабатываний защиты при внешних КЗ.

В настоящее время на длинных ВЛ, где необходима компенсация емкостных токов, в России используется ДФЗ с применением составляющих токов прямой и обратной последовательностей. При этом в органе манипуляции ВЧ-передатчиком производится компенсация емкостных токов линии по этим последовательностям. Традиционные дифференциальные защиты, а также дифференциальная защита ВЛ, выполненная по [1], работают с использованием полных токов, поскольку эти защиты устанавливаются на линиях небольшой протяженности, а потому не нуждаются в компенсации емкостных токов. Для направленных ВЧ-защит используются составляющие токов и напряжений обратной последовательности независимо от длины защищаемой ВЛ. Отказ от использования полных токов обусловлен тем, что под влиянием взаимоиндукции источник несимметрии может «попадать» на неповрежденную ВЛ, что может приводить к излишнему срабатыванию таких защит.

Компенсация емкостных токов прямой и обратной последовательностей не встречает серьезных трудностей, так как взаимоиндуктивность между идущими в одном коридоре линиями для этих последовательностей мала и ею можно пренебречь. Компенсирующие устройства могут быть выполнены с достаточной степенью точности на каждом из концов ВЛ с использованием напряжения соответствующей последовательности и модели защищаемой ВЛ, соответствующей протеканию протеканию емкостных токов прямой или обратной последовательностей при внешнем КЗ. С помощью упомянутых моделей по напряжениям конца линии, где установлена защита, и напряжениям противоположного конца, полученным, например, с помощью фантомных схем, могут быть выделены емкостные токи при внешних КЗ и произведено их вычитание из полных токов ВЛ соответствующих последовательностей.

В ряде случаев использование полных токов КЗ или токов нулевой последовательности для выполнения ДФЗ, НЗ с ВЧ-каналом связи или ДЗ с цифровым каналом связи позволило бы значительно улучшить их характеристики и упростить схемы [1]. Однако при этом необходимо производить компенсацию полного емкостного тока, включая ток нулевой последовательности. До последнего времени считалось, что компенсация емкостных токов нулевой последовательности от напряжения нулевой последовательности защищаемой линии ($U_0$) не может быть использована из-за влияния взаимоиндукции ВЛ, идущих в одном коридоре. Теоретически эта проблема была исследована в [2]. Однако выводы [2] касались качественной стороны вопроса и не сопровождались конкретными расчетами.

Целью статьи является количественная оценка

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

погрешности компенсации при отсутствии учета взаимоиндукции по нулевой последовательности для ВЛ, идущих в одном коридоре. Такая оценка позволила бы определить область, в которой компенсация емкостных токов возможна без учета взаимоиндукции и, следовательно, возможно использование в ВЧ-защитах составляющей тока нулевой последовательности и полных токов для дифференциальных защит.

Некомпенсируемый емкостный ток нулевой последовательности из-за неучета взаимоиндукции между линиями, идущими в одном коридоре, обусловлен ЭДС взаимоиндукции, которая составляет некоторую долю фазной ЭДС. Рассмотрим однофазное КЗ в середине одной из двух линий 750 кВ, идущих в одном коридоре. Предельный случай, связанный с максимальным током КЗ, соответствует условию, когда сопротивления систем, связываемых указанными линиями по прямой, обратной и нулевой последовательностями, равны нулю ($x_{c1}=0$; $x_{c2}=0$; $x_{c0}=0$). В этом режиме параллельная неповрежденная ВЛ не влияет на ток КЗ поврежденной ВЛ, поскольку ток нулевой последовательности по ней не протекает. Значение тока КЗ может быть рассчитано по схеме замещения линии с сосредоточенными параметрами, и по нему можно определить распределенную ЭДС взаимоиндукции, наведенную по неповрежденной ВЛ $E_{р.в}$.

Для примера принимаем, что обе ВЛ имеют длину $l$ км и удельные сопротивления: $x_1=0{,}3$ Ом/км — по прямой последовательности и $x_0=0{,}7$ Ом/км — по нулевой последовательности. Ток нулевой последовательности с каждой стороны поврежденной линии при фазной ЭДС $E_ф$ составляет

$$I_0 = \frac{E_ф}{0{,}5\,l\,(2x_1 + x_0)}.$$

На рис. 1 приведена схема замещения рассматриваемой сети с наведенными ЭДС взаимоиндукции и эпюра распределения напряжения нулевой последовательности на неповрежденной ВЛ. Значение указанной ЭДС в середине ВЛ относительно любого из концов может быть найдено как

$$E_{р.в} = I_0 x_m \frac{l}{2},$$

где $x_m=0{,}4x_0$ — удельное сопротивление взаимоиндукции параллельных ВЛ для тока нулевой последовательности при среднегеометрическом расстоянии между цепями 50 м [2].

Подставив значения величин, получим, что $E_{р.в}$ составляет 93,5 кВ. Емкостный ток нулевой последовательности неповрежденной ВЛ, обусловленный этой ЭДС, с каждой стороны линии длиной 400 км, при емкостной проводимости $b_0=3{,}4\cdot10^{-6}$ 1/Ом·км, составляет

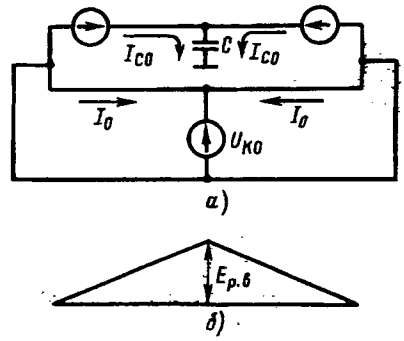



**Рис. 1.** Схема замещения нулевой последовательности участка сети с гальванически связанными параллельными линиями и эпюра наведенного напряжения нулевой последовательности

$$I_{c0} = \frac{E_{р.в}}{2} b_0 \frac{l}{2} = 31{,}6 \text{ А}.$$

Этот ток не компенсируется, поскольку напряжение нулевой последовательности на шинах, от которых отходят линии, при принятых сопротивлениях систем равно нулю и нет напряжения, от которого можно было бы осуществить компенсацию.

Полный некомпенсированный дифференциальный емкостный ток неповрежденной линии, от которого необходимо обеспечить отстройку дифференциальной защиты, равен удвоенному току по концам линии и составляет 63,2 А. При номинальном токе трансформаторов тока линии 1500 А этот ток равен примерно 4% и при уставке дифференциальной защиты 15—25% номинального тока им можно пренебречь.

Вторым расчетным случаем является однофазное КЗ на конце параллельной гальванически не связанной линии, идущей в одном коридоре с линией, работа защиты которой анализируется (рис. 2,*а*). Пусть сопротивления нулевой последовательности систем равен между собой и много меньше сопротивления нулевой последовательности линии. При протекании тока нулевой последовательности по поврежденной линии в неповрежденной наводится ЭДС взаимоиндукции $E_{р.в}$, которая приводит к распределению напряжения нулевой последовательности вдоль линии, показанному на рис. 2,*б*. Под действием указанного напряжения нулевой последовательности по концам неповрежденной линии протекают равные и одинаковые направленные емкостные токи нулевой последовательности $I_{c0}$. Геометрическая сумма этих токов в дифференциальной защите равны нулю, и на ее работу эти токи влияния не оказывают.

Следует отметить, что расчеты, проведенные по методике, изложенной в [2], показывают, что рас-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

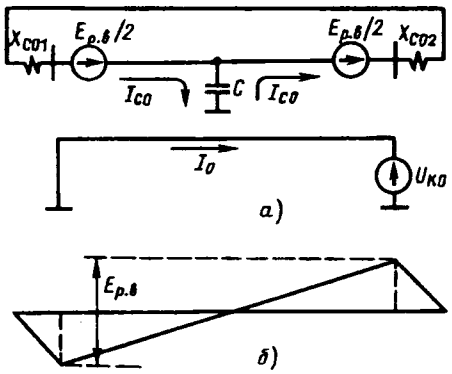



**Рис. 2.** Схема замещения нулевой последовательности участка сети с гальванически не связанными линиями, идущими в одном коридоре, и эпюра наведенного напряжения нулевой последовательности

смотренный в ней случай недокомпенсации из-за взаимоиндукции нулевой последовательности не является самым тяжелым, а приведенный расчет для схемы рис. 1 дает больший пескомпенсированный емкостный ток. При этом приведенный анализ гораздо более «прозрачный», чем в [2].

**Вывод.** Представляется целесообразным выполнять компенсацию емкостных токов нулевой последовательности для ВЛ, идущих в одном коридоре, без учета взаимоиндукции между ними, поскольку для случая гальванически связанных линий емкостный ток от взаимоиндукции составляет менее 5% номинального тока трансформаторов тока ВЛ, а для случая гальванически не связанных ВЛ необходимость компенсации принципиально отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **J. Kobayshi et. al.** The State of the art of multi-current and multi-terminal-overhead transmission line protection systems associated with telecommunication system. — SIGRE. d GRUP 34, Protection, papers of the 1990 session, 34—201.

2. **Сапир Е.Д.** Компенсация емкостных токов в дифференциально-фазной высокочастотной защите линии. — Электричество, 1958, № 10

*[30.11.95]*

*Авторы:* ***Алексеев Владимир Георгиевич*** *окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1973 г. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка статистического метода выбора параметров расчетного переходного режима короткого замыкания для нормирования погрешностей трансформаторов тока сверхвысокого напряжения» в Научно-исследовательском институте электроэнергетики (АО ВНИИЭ). Старший научный сотрудник ВНИИЭ.*

***Левиуш Александр Ильич*** *окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1958 г. В 1993 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Теория и практика выполнения высокочастотных защит электрических сетей 110—1150 кВ» в АО ВНИИЭ. Заведующий сектором защиты высоковольтных сетей АО ВНИИЭ.*

# Исследование магнитного поля и электродинамических параметров линейного электродвигателя с большим зазором

**МИЛЫХ В.И.**

*Изложена методика расчета и проведен расчетный анализ магнитного поля и электродинамических параметров (сил, индуктивностей и др.) в двух ортогональных сечениях линейного электродвигателя, отличающегося относительно большим зазором и нетипичной структурой катушек индуктора. В качестве основного использован метод зеркальных отображений, который частично продублирован методом конечных разностей и подтвержден измерениями на экспериментальном образце двигателя.*

Ключевые слова: *линейные электродвигатели, электродинамические параметры, магнитное поле, исследования, метод зеркальных отображений*

*The methods of computation is stated and the designed analysis of the magnetic field and electrodynamic parameters (forces, inductions and others) in two orthogonal cross-sections of the linear electric mitor distinguishing for its relatively large gap and non-typical design of inductor coils is presented. As a basic method is used the method of mirror-image presentation which is partly doubled by the method of finite differences and conflirmed by the measurements at the experimental prototype motor.*

Key words: *linear electric motor, electrodynamic parameters, magnetic field, investigation, method of mirror-image presentation*

В семействе аналогов [1, 2] особенности конструкции рассматриваемого линейного электродвигателя (ЛЭД) предопределены его назначением — управляемое ускорение различных объек-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

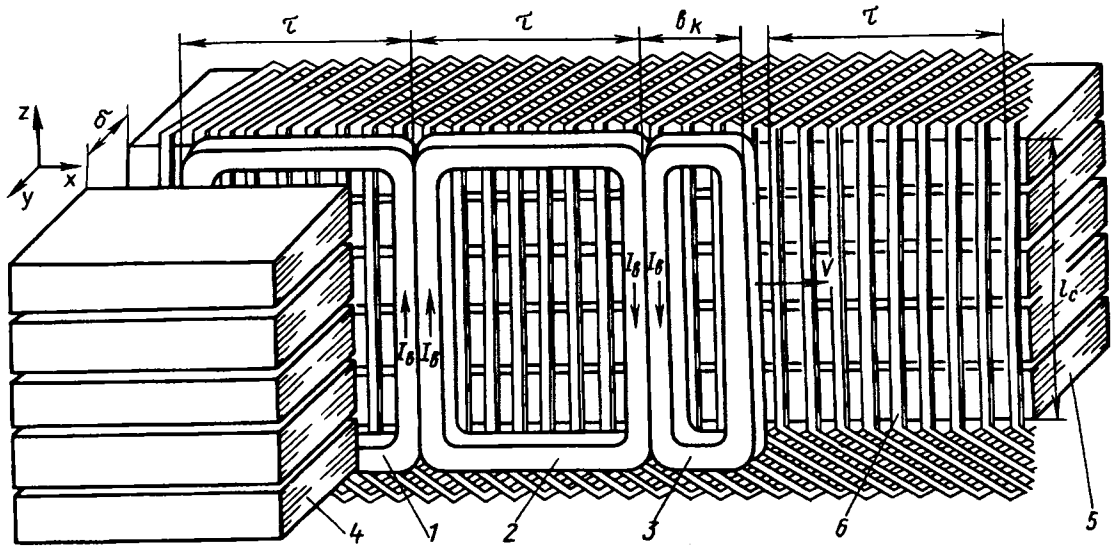



**Рис. 1.** Электромагнитная система экспериментального образца ЛЭД: *1, 2* — основные и *3* — вспомогательная катушки индуктора; *4, 5* — пакетированные сердечники двухстороннего статора; *6* — секции обмотки якоря

тов. Выбранная схема электромагнитной системы ЛЭД (рис. 1) должна обеспечить минимальную инерцию и по принципу действия соответствует машинам постоянного тока с движущимся индуктором и обмоткой якоря (ОЯ), расположенной на статоре.

Индуктор является неферромагнитным и включает две (как изображено на рис. 1) или более несущих катушек, а также одну вспомогательную, расположенную впереди по ходу и способствующую коммутации ОЯ.

Секции ОЯ закреплены на обращенных в зазор $\delta$ поверхностях стального шихтованного сердечника двухстороннего статора. Посредством коммутации токонесущий участок ОЯ перемещается синхронно с индуктором и занимает зону $p\tau$, где $\tau$ — полюсное деление, $p$ — число несущих катушек (или число полюсов).

Модель на рис. 1 соответствует созданному экспериментальному макетному образцу ЛЭД и в представленном виде достаточна для выполнения основной цели статьи — анализа магнитного поля (МП) и ряда электродинамических параметров. Однако следует отметить, что к главным задачам проводимых расчетно-экспериментальных исследований ЛЭД прежде всего относится проверка идеи естественной вентильной коммутации ОЯ, обоснованной в [3] и базирующейся на схеме с управляемыми тиристорами, приведенной, например, в [4]. Поэтому здесь должна быть подготовлена основа для следующей статьи, посвященной этой системе коммутации и ее экспериментальному подтверждению.

При проведении исследований будем ориентироваться на размеры экспериментального образца ЛЭД: $\delta=0{,}072$ м; $\tau=0{,}24$ м; $b_к=0{,}1$ м; $l_с=0{,}3$ м; длина сердечника статора по направлению движения — около 9 м. Число витков каждой катушки индуктора $w_k=58$; в секции ОЯ — $w_s=4$; номинальные значения токов в обмотках соответственно $I_в=770$ А и $i_a=350$ А. Плотность тока примерно на порядок превышала принятые в электрических машинах значения, что допустимо при практически импульсном режиме статора ЛЭД.

**Методика расчета магнитного поля.** Беззубцовый сердечник статора и неферромагнитный индуктор облегчают решение полевой задачи. Но в то же время, увеличенный зазор $\delta$ способствует краевому эффекту (прежде всего по оси $z$). Усложняющим фактором, кроме того, является отсутствие периодичности и симметрии по оси $x$. В целом полевая задача близка к классу трехмерных, но решение ее будем проводить значительно более экономными средствами, используя совокупность плоскостенных решений [5].

В первую очередь рассмотрим МП в центральном поперечном сечении, подразумевая координатную плоскость $xy$, относительно которой магнитная система ЛЭД симметрична по оси $z$ (рис. 1). Именно здесь МП наиболее близко к плоскопараллельному ввиду максимальной удаленности от соответствующих торцевых зон. Шихтованно-пакетированный сердечник можно представить однородным с магнитной проницаемостью

$$\mu_э = \mu_с(1-k_з) + \mu_0 k_з,$$

где $\mu_с$ и $\mu_0$ — магнитные проницаемости стальных листов и прослоек между ними ($\mu_0=4\pi10^{-7}$ Гн/м); $k_з$ — результирующий коэффициент заполнения сердечника сталью.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Остановимся на варианте, когда индуктор по оси $x$ достаточно удален от концов сердечника. С учетом предыдущего задача сводится к расчету двухмерного МП в зазоре $\delta$, ограниченном однородными протяженными сердечниками, причем возбуждающими являются стороны обмоток, ориентированные по оси $z$. Подобная расчетная модель представлена на рис. 2. Точнее, это ее участок по оси $x$, на котором для примера размещены сечения нескольких сторон катушек индуктора.

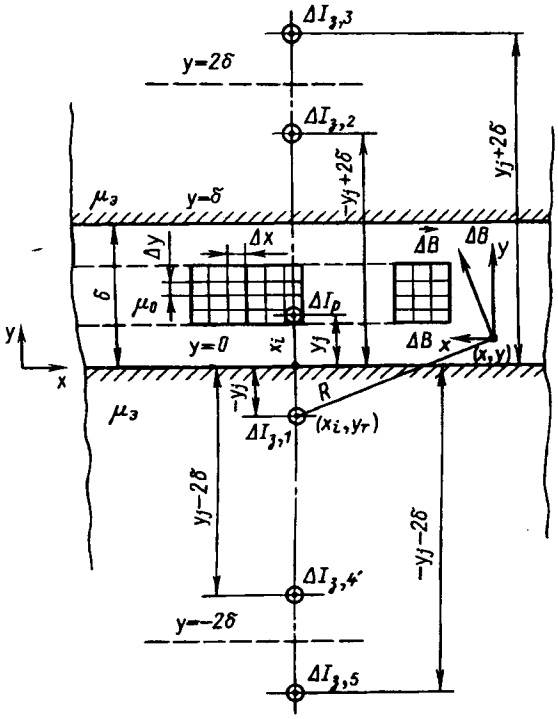



Рис. 2. Расчетная модель электромагнитной системы ЛЭД со структурой отображений элементов тока $\Delta I$

В определенных условиях оказывается приемлемым использование одного из эффективных и алгоритмичных методов расчета полей — метода зеркальных отображений (МЗО) [6, 7]. Следуя ему, МП в зазоре можно рассчитать, рассматривая всю область однородной с магнитной проницаемостью $\mu_0$, а влияние сердечников — заменяя системой множественных отображений токов. И здесь наступает очередь метода наложения, т. е. результаты будем получать, суммируя действие реальных токов в зазоре и всех их отображений. Более того, сечения сторон катушек условно раздробим на элементы с размерами $\Delta x\,\Delta y$ (пример показан на рис. 2), причем элементы не обязательно должны быть одинаковыми. При допущении равномерной плотности тока в сечении катушек на элемент приходится ток

$$\Delta I_{\text{р}} = (w_k I_{\text{в}}\,\Delta x\,\Delta y)/S_k\,,$$

где $S_k$ — площадь поперечного сечения стороны катушки.

Система отображений одного реального элемента с током $\Delta I_{\text{р}}$ строится следующим образом. Одна координата — $x_i$ у них является неизменной. Если по другой оси координата центра сечения реального элемента $y_i$, то его первое отображение относительно линии $y=0$ имеет $y=-y_j$ — это $\Delta I_{\text{э}1}$. Затем сразу получается пара отображений $\Delta I_{\text{э}2}$ и $\Delta I_{\text{э}3}$ относительно линии $y=\delta$, соответствующих $\Delta I_{\text{э}1}$ и $\Delta I_{\text{р}}$. Вновь полученная пара дает отображения $\Delta I_{\text{э}4}$ и $\Delta I_{\text{э}5}$ относительно линии $y=0$. Продолжив, получим полную систему, характеризующуюся координатами [7]:

$$y_{\text{т}} = \pm y_j \pm 2\delta k\,, \qquad (1)$$

где при $k=0$ получаются реальный ток и первое отображение, а каждое следующее значение $k=1$, 2, ... дает сразу четверку очередных отображений.

Ток отображения получается умножением своего предыдущего значения на коэффициент

$$k_\mu = (\mu_{\text{э}} - \mu_0)/(\mu_{\text{э}} + \mu_0)\,,$$

который при обычном соотношении $\mu_{\text{э}} \gg \mu_0$ близок к единице, следовательно, отображенные токи практически равны $\Delta I_{\text{р}}$.

Каждый прямоугольный элемент удобно представить круговым с радиусом

$$\rho = \sqrt{(\Delta x\,\Delta y)/\pi}\,.$$

Тогда при расчете МП можно использовать классические формулы для длинного проводника с током в однородном пространстве [6].

Модуль вектора магнитной индукции (МИ) в точке $(x, y)$ от элемента тока $\Delta I_{\text{т}}$ с координатами его центра $(x_i, y_{\text{т}})$ (см. рис. 2) запишем как

$$\Delta B = C_{\text{т}}/R, \text{ если } R \geq \rho \text{ и } \Delta B = C_{\text{т}} R/\rho^2, \text{ если } R < \rho,$$

где $R=\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_{\text{т}})^2}$; $C_{\text{т}}=(\mu_0\,\Delta I_{\text{т}})/2\pi$.

Результирующие составляющие и модуль МИ получаются суммированием:

$$B_x = \sum_{g=1}^{G}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=0}^{K}\Delta B_x\,;$$

$$B_y = \sum_{g=1}^{G}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=0}^{K}\Delta B_y\,;\quad B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}\,,$$

где $G$ — число сторон катушек; $m$, $n$ — числа элементов по ширине и высоте их сечений; $K$ — количество циклов отображений (1); $\Delta B_x$ и $\Delta B_y$ — составляющие вектора МИ одного элемента;

$$\Delta B_x = -\Delta B\,(y-y_{\text{т}})/R\,;\quad \Delta B_y = \Delta B\,(x-x_i)/R\,.$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Векторный магнитный потенциал (ВМП) в рассматриваемых условиях имеет только составляющую по оси $z$ и также получается суммированием:

$$A_z = \sum_{g=1}^{G} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} \sum_{k=0}^{K} \Delta A_z ,$$

где

$$\Delta A_z = \begin{cases} C_{\text{т}} \ln (R_\infty/\rho) & \text{при } R \geqslant \rho ; \\ C_{\text{т}} [\ln (R_\infty/\rho) - R^2/2\rho^2) + 0{,}5] & \text{при } R < \rho ; \end{cases}$$

$R_\infty$ — удаление от $\Delta I_{\text{т}}$, на котором можно пренебречь величиной МП.

Выбор значений $m$, $n$ и $K$ — это компромисс между расчетной точностью и временем счета. Увеличение $m$ и $n$ влияет в основном на результат внутри или вблизи сечений сторон катушек. Вычислительные эксперименты показали, что удовлетворительную точность дают в случае катушек индуктора, например, значения $m=5$, $n=6$. Влияние на результат числа серий отображений $K$ по формуле (1) характеризует табл. 1, где $B_{y1}$, $B_{y2}$, $B_{y3}$ — значения составляющих МИ в середине каждой из трех катушек индуктора (см. рис. 1) на линии расположения ОЯ. Ясно, что при расчетах можно ориентироваться на 20—30 серий отображений.

*Таблица 1.*

| Число серий отображений $K$ | Магнитная индукция, Тл | | |
|---|---|---|---|
| | $B_{y1}$ | $B_{y2}$ | $B_{y3}$ |
| — | -0,192 | 0,217 | -0,392 |
| 1 | -0,648 | 0,719 | -0,752 |
| 3 | -0,738 | 0,793 | -0,730 |
| 5 | -0,755 | 0,795 | -0,724 |
| 10 | -0,766 | 0,789 | -0,726 |
| 20 | -0,772 | 0,784 | -0,730 |
| 30 | -0,774 | 0,782 | -0,732 |
| 40 | -0,775 | 0,781 | -0,733 |
| 50 | -0,776 | 0,781 | -0,733 |

Приведенные примеры показывают, что при сравнительной простоте алгоритма МЗО основная сложность его использования — большой объем вычислительной работы. При приемлемых затратах можно использовать ЭВМ среднего класса, в частности расчеты были проведены на компьютере типа IBM PC-AT 286/287.

**Электродинамические параметры** ЛЭД находятся уже на основе ВМП и МИ. Составляющие последних, полученные в поперечном сечении, определяют параметры на единицу длины по оси $z$. Умножение на активную длину обмоток $l_a$ позволяет получить полные значения величин.

Составляющие электродинамического усилия (ЭДУ), действующего на сторону катушки или секции,

$$F_x = -l_a \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} B_{y,j,i} \Delta I_{\text{p},j,i} ;$$

$$F_y = l_a \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} B_{x,j,i} \Delta I_{\text{p},j,i} . \qquad (2)$$

Мгновенное значение электродвижущей силы (ЭДС), наводящейся в секции ОЯ движущимся со скоростью $V_i$ индуктором,

$$e_a = \frac{w_s l_a V_i}{S_a} \left( \sum_{j=1}^{n1} \sum_{i=1}^{m1} B_{y,j,i} \Delta x_i \Delta y_j - \sum_{j=1}^{n2} \sum_{i=1}^{m2} B_{y,j,i} \Delta x_i \Delta y_j \right),$$

где $m1$, $n1$, $m2$, $n2$ — параметры дробления сечения сторон секции; $S_a$ — площадь сечения.

Магнитный поток, пронизывающий тонкосторонний контур,

$$\Phi = l_a (A_{z1} - A_{z2}) , \qquad (3)$$

где $A_{z1}$, $A_{z2}$ — значения ВМП в точках, совпадающих с сечениями сторон.

Коэффициент взаимной индуктивности двух катушек с номерами, например $l$ и $k$,

$$M_{k,l} = \frac{l_a}{I_k I_l} \left( \sum_{j=1}^{n1} \sum_{i=1}^{m1} A_{z,j,i,l} \Delta I_{\text{p},j,i,k} + \sum_{j=1}^{n2} \sum_{i=1}^{m2} A_{z,j,i,l} \Delta I_{\text{p},j,i,k} \right), \qquad (4)$$

где $A_{z,j,i,l}$ — ВМП поля, созданного катушкой $l$, имеющей $w_l$ витков и ток $I_l$; $w_k$, $I_k$ — число витков и ток катушки $k$, по токовым элементам $\Delta I_{\text{p},j,i,k}$ которой проводится суммирование (если $k$ и $l$ совпадают, то получится индуктивность катушки).

Магнитное потокосцепление катушки $k$

$$\Psi_k = \frac{w_k l_a}{S_k} \left( \sum_{j=1}^{n1} \sum_{i=1}^{m1} A_{z,j,i} \Delta x_i \Delta y_j - \sum_{j=1}^{n2} \sum_{i=1}^{m2} A_{z,j,i} \Delta x_i \Delta y_j \right),$$

которое может оказаться собственным или взаимным, в зависимости от того что является источником поля, представленного ВМП $A_{z,j,i}$.

**Результаты расчета МП в поперечном сечении** представляются при номинальных токах обмоток. Распределения составляющих МИ показаны на рис. 3. Они получены отдельно для ОЯ и обмотки индуктора по линиям, обозначенным на расчетной модели. Влияние сердечника статора выявляются из сравнения данных с ним и без него. На совмещенной расчетной модели изображены стороны катушек индуктора и секций ОЯ, участвующих в возбуждении МП.

Результаты на рис. 3 выглядят физически естественными. Однако характерная для МЗО идеализация расчетной модели потребовала их под-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

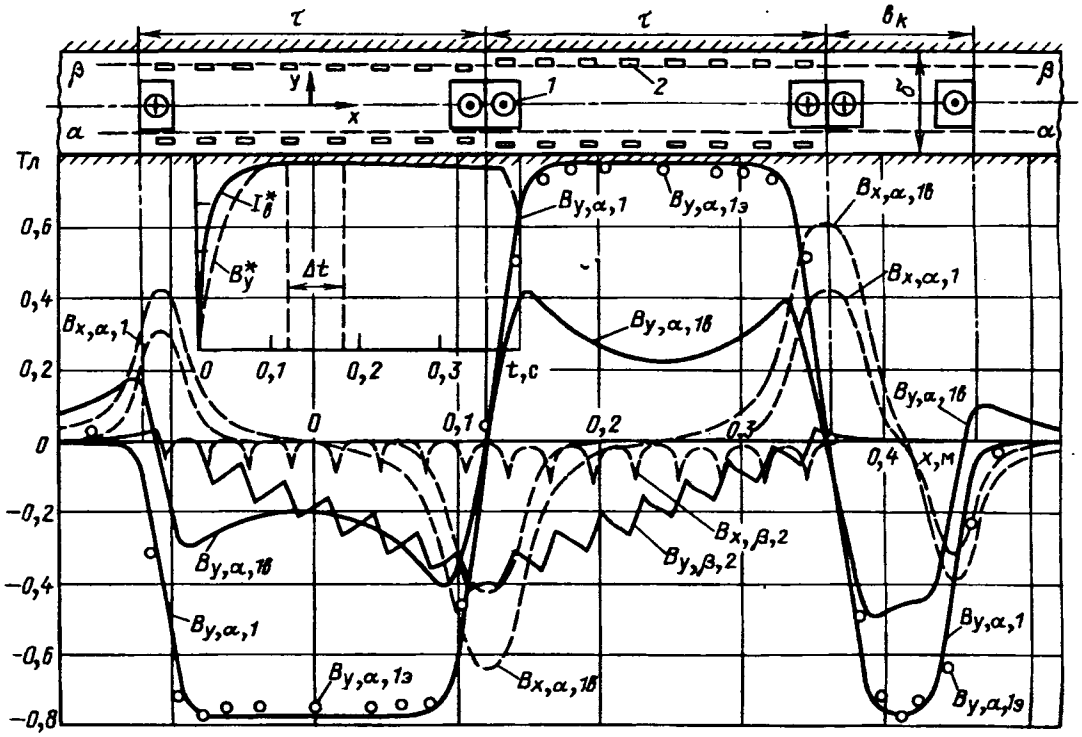



**Рис. 3.** Распределение составляющих магнитной индукции $B_x$ и $B_y$; по обозначенным линиям приняты обозначения в индексах:
$\alpha$, $\beta$ — линия расчета; *1*, *2* — поле индуктора и ОЯ; «*в*» — модель без сердечника; «э» — экспериментальные данные

тверждения. Это сделано дублированием расчета другим методом, а также проведением измерений на макетном образце ЛЭД. В качестве дублера использован метод конечных разностей (МКР) [8]. Расчетная область в поперечном сечении занимает симметричную половину по оси $y$ и изображена на рис. 4. Она имеет конечную толщину сердечника и реальную протяженность по оси $x$ (по этому направлению показана ограниченная часть в зоне расположения индуктора).

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu\frac{\partial A_z}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu\frac{\partial A_z}{\partial y}\right)=-J_z, \qquad (5)$$

где $J_z$, $A_z$ — составляющие плотности тока обмоток и ВМП, ортогональные плоскости расчета; $\nu$ — удельное магнитное сопротивление.

На нижней границе $\gamma$ задано условие Неймана, на верхней границе за пределами сердечника и на удаленных левой и правой границах $\Gamma$ — условие Дирихле:

$$\left(\frac{\partial A_z}{\partial y}\right)_\gamma=0; \qquad (A_z)_\Gamma=0.$$

В соответствии с МКР использовалась наиболее подходящая в данном случае неравномерная прямоугольная сеточная модель (фрагмент ее показан) и пятиточечный конечно-разностный аналог уравнения (5). При численном решении соответствующей системы разностных уравнений итерационным методом проводился пересчет значений $\nu$ с учетом кривой намагничивания стали сердечника (практика решения соответствует [9] и другим известным работам).

Полученная картина МП в виде линий $A_z$= =const показана на рис. 4. Линии проведены через 0,05 отн. ед. при нормировке потенциала его максимальным значением $A_{z\,max}$= =0,130 Вб/м. Построены также распределения $B_y$ по линии $\gamma$, рассчитанные как МКР, так и МЭО, и еще без наличия сердечников (последние две кривые перевернуты по знаку, чтобы не сливались с предыдущей). Ступенчатость кривой $B_{y,\gamma}^{МКР}$ объясняется дискретной сеточной структурой модели при МКР, а ее близость к $B_{y,\gamma}^{МЗО}$ свидетельствует в пользу обоих методов. Относительно небольших различия МИ по величине вызваны учетом влияния конечных размеров и насыщения сердечника при использовании МКР.

Опыт показал, что из-за значительной протяженности области расчета, требующей соответствующего количества линий сетки, а также из-за переменно-плоскостной структуры поля расчет МКР сходится весьма медленно. Зато МП получается полностью во всей области и необходимые электродинамические параметры могут быть извлечены уже практически без затрат. Более быстр МЗО, так как расчет МП проводится только в

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

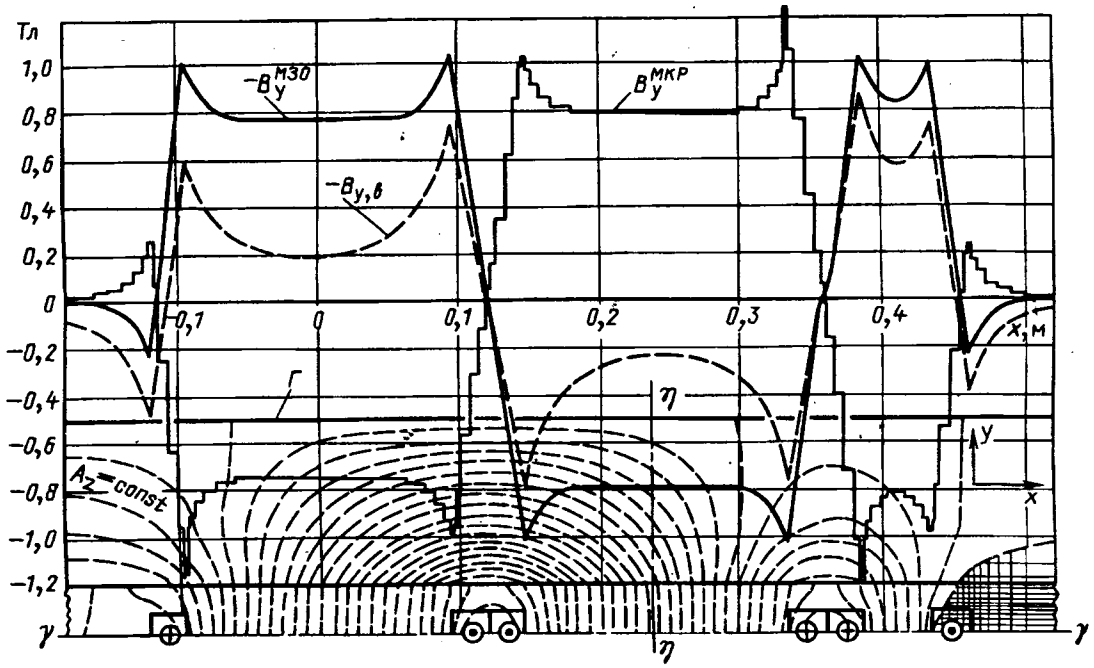



**Рис. 4.** Картина магнитного поля обмотки индуктора и сравнение распределений $B_y$ по линии $\gamma$: $B_y^{МЗО}$ — метод зеркальных отображений; $B_y^{МКР}$ — метод конечных разностей; $B_{y,b}$ — расчет без учета сердечника статора

конкретных точках. Потому предварительный анализ МП и электродинамических параметров при варьировании размеров ЛЭД лучше проводить МЗО, а итоговые результаты выбранного варианта — МКР.

Метод конечных разностей позволил также провести расчет МП при положении индуктора по оси $x$ у края сердечника (далее область расчета не обрывалась и характеризовалась свойствами неферромагнитной среды). Было установлено, что в рабочей зоне индуктора МП практически не изменилось, а основные различия наблюдались за ее пределами, где абсолютные значения МИ в обоих случаях уже относительно малы и особого интереса не представляют. Просто магнитный поток, замыкавшийся ранее влево (см. рис. 4), переориентировался по сердечнику вправо — в сторону его большей протяженности.

**Измерения МП на макетном образце** проведены с помощью датчиков ЭДС Холла. Сложность этого заключалась в том, что питание индуктора было допустимо только в кратковременном (практически импульсном) режиме из-за высокой плотности тока в его обмотке. Сигналы с датчиков и токового шунта в цепи обмотки фиксировались запоминающими электронными осциллографами типа С8-13. Синхронные осциллограммы тока $I_в^*(t)$ и магнитной индукции $B_y^*(t)$ в безразмерной форме приведены в виде вставки на рис. 3. Расхождения этих кривых на переднем фронте связаны с запаздыванием МП из-за противодействия короткозамкнутых контуров в конструкции индуктора — каркасы катушек, обшивка. Конкретные результаты считывались на локально стабильном участке $\Delta t$.

Измеренное распределение составляющей МИ $B_y$ в воздушном зазоре между поверхностями индуктора и статора дано на рис. 3 в сопоставлении с ранее рассчитанными данными на соответствующей линии $\alpha$—$\alpha$. Наряду с осциллографированием измерения дублировались цифровыми вольтметрами типа В-7-77 (4е) (добивались считывания сигналов в интервале $\Delta t$). Уменьшение тока и МИ на осциллограммах после $\Delta t$ объясняется увеличением сопротивления обмотки из-за ее нагрева.

Очевидна близость расчетных и измеренных данных как по характеру, так и по величине (добавим, что по расчету МКР получались еще более близкие к измеренным значениям), а имеющиеся расхождения можно объяснить принятыми при расчетах допущениями и погрешностями измерений.

**Распределение МП в продольном сечении** получим расчетом в одной из плоскостей $yz$, взяв за основу методику [10]. Расположение этого сечения показано на рис. 4 линией $\eta$—$\eta$ в середине одной из основных катушек. Здесь в меньшей мере сказывается поперечный краевой эффект, связанный с конечной шириной катушек, а отсутствие в зазоре составляющей МИ $B_x$ дает возможность оставшиеся две составляющие рассмотреть в ортогональном сечении $yz$, показанном на рис. 5.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

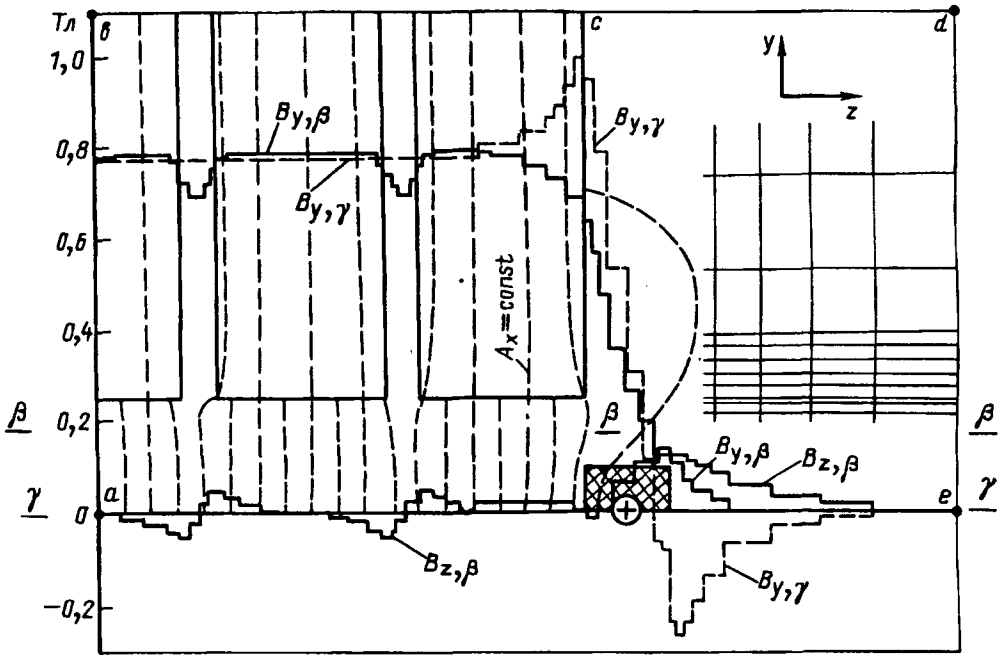



**Рис. 5.** Расчетная модель в продольном сечении ЛЭД (показаны картина МП катушки индуктора и распределение составляющих МИ по линиям $\beta$ и $\gamma$)

В продольном сечении МП можно было бы считать чисто плоскопараллельным, если бы в плоскости $xy$ силовые линии вблизи линии $\eta$—$\eta$ были бы параллельны (это соблюдается в зазоре, но искажено в сердечнике). Однако методика [5, 10] позволяет привести выделенный вблизи линии $\eta$—$\eta$ неплоский слой магнитного поля к плоскостному случаю необходимой коррекцией распределения $\nu(y, z)$ в расчетной области $yz$ на рис. 5, что делалось и в данном случае.

Расчетное сечение занимает симметричную четверть всего продольного сечения ЛЭД и включает в себя пакетированный сердечник и сечение лобовой части катушки индуктора, исследованием магнитного поля которого здесь и ограничимся. В пределах шихтованных пакетов сердечника удельное магнитное сопротивление задается двухкомпонентным:

$$\nu_y = \frac{\nu_c \nu_0}{\nu_c(1-k_з)+\nu_0 k_з}; \quad \nu_z = \nu_c k_з + (1-k_з),$$

где $\nu_0 = 1/\mu_0$; $\nu_c = 1/\mu_c$, в остальной части области сохраняется изотропия, т. е. $\nu = \nu_y = \nu_z$.

Основное расчетное уравнение подобно (5) с необходимой модификацией и соответствует представленному в [10]:

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_z \frac{\partial A_x}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_y \frac{\partial A_x}{\partial z}\right) = -J_x, \qquad (6)$$

где $J_x$, $A_x$ — составляющие плотности тока в ВМП, ортогональные рассматриваемой плоскости.

Граничное условие Дирихле $A_{cd} = A_{de} = 0$ ограничивает область распространения поля в торцевой части.

Условие Неймана

$$\left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)_{ae} = 0; \quad \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)_{bc} = 0$$

на линиях $ae$ и $bc$ имитирует свободный вход—выход линий МП.

Введенное в [10] комбинированное условие

$$A_{ab} = C_\nu; \quad \int_a^b \nu_y \frac{\partial A_x}{\partial z} dy = U_{m,ab} \qquad (7)$$

на линии $ab$ учитывает симметрию по оси $z$ и одновременно задает падение магнитного напряжения $U_{m,ab}$ вдоль этой линии, которое определяется предварительно в поперечном сечении по формуле

$$U_{m,ab} = \int_\eta \nu \frac{\partial A_z}{\partial x} dy.$$

Так связываются на общей линии решения в двух сечениях.

Решение уравнения (6) с учетом граничных условий получается численно МКР с использованием прямоугольной неравномерной сетки. При этом, наряду со значениями ВМП в узлах сетки, определяется и входящая в условие (7) константа $C_\nu$ [10].

Результаты расчета иллюстрируются на рис. 5 картиной эквипотенциалей, проведенных через 0,05 отн. ед. при нормировке ВМП значением

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$A_{x\max}$=0,122 Вб/м. Кроме того, построены распределения составляющих магнитной индукции, определенных на основе формул

$$B_y = -\partial A_x/\partial z; \quad B_z = \partial A_x/\partial y.$$

На рис. 6 показана еще одна расчетная модель в продольном сечении (для наглядности полностью по оси $z$), отличающаяся от предыдущей идеализированной (рис. 5) наличием нажимных фланцев, имеющихся в конструкции макетного образца. Здесь проведено сопоставление расчетного и измеренного распределений $B_y$ по линии $\alpha$—$\alpha$. Несимметрию и некоторый разброс измеренных значений (в отличие от правильной расчетной кривой) можно объяснить технологическими отклонениями при пакетировании сердечника, а также погрешностями измерений. В целом измерения и расчет хорошо согласуются, в том числе и на выходе в торцевые зоны, где характер МП наиболее сложен и является трехмерным.

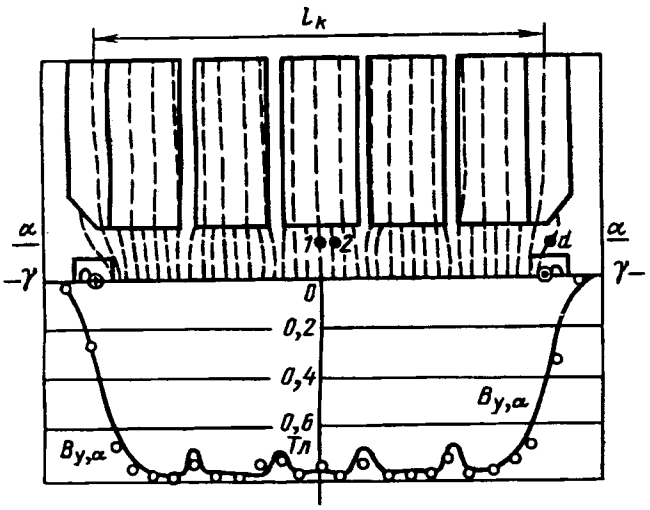



**Рис. 6.** Сравнение расчетных (линия) и измеренных (точки) данных $B_y$ по линии $\alpha$—$\alpha$ в продольном сечении ЛЭД

Наряду с наглядным представлением МП, расчет в продольном сечении позволяет определить активную длину обмоток в обычном понимании ее для электрических машин [4]. Только в данном случае удобно оперировать не с функцией $B_y(z)$, а непосредственно с ВМП. Так, по линии $\alpha$—$\alpha$ рис. 6 активная длина

$$l_a = 2\Delta x \frac{A_{xd} - A_{x1}}{A_{x2} - A_{x1}},$$

где $A_{x1}$, $A_{x2}$ и $A_{xd}$ — значения ВМП в обозначенных точках; $\Delta x$ — расстояние между точками *1* и *2* (все точки на выбранной линии).

Точки *1* и *2* находятся рядом под серединой сердечника, где проходило поперечное сечение ЛЭД (найденные здесь распределения МП являются основой для параметров, определяемых по формулам (2)—(4) и другим. Точка $d$ отмечает конец боковых сторон обмоток ($l_k$ — их длина).

Так, для модели на рис. 6, получено значение $l_a$=0,306 м при $l_k$=0,324 м. Расчет МП, проведенный на аналогичной модели, но со сплошным сердечником без межпакетных каналов, проявил их роль для активной длины: она увеличилась до 0,311 м. В условиях большого зазора изменение не столь велико, если учесть, что общая ширина четырех каналов составляет 0,04 м.

Если активную длину определять для самой обмотки индуктора и расположить точки по ее средней линии $\gamma$—$\gamma$, то получаем $l_a$=0,327 м для обеих моделей (рис. 5 и 6).

**Электродинамические параметры** ЛЭД, вычисленные по приведенным уже формулам на основе расчета МП, соответствуют питанию обмоток номинальными токами.

В табл. 2 даны ЭДУ, действующие на стороны катушек индуктора при учете только его собственного МП (здесь значения на единицу длины). При симметричном положении индуктора в зазоре составляющая $F_y$ отсутствует. Однако возможно ее появление при смещении индуктора по оси $y$ на $\Delta y$, что и проиллюстрировано в таблице. При этом составляющие $F_x$ практически не изменяются.

*Таблица 2*

| Составляющие сил | Смещение катушек $\Delta y$, мм | Значение сил, кН/м, действующих на стороны катушек с номерами | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| $F_x$ | 0 | -17,0 | 20,7 | -21,4 | 21,4 | -20,8 | 17,1 |
| $F_y$ | 1 | 0,38 | 0,66 | 0,66 | 0,64 | 0,60 | 0,30 |
| | 2 | 0,76 | 1,32 | 1,32 | 1,28 | 1,20 | 0,60 |
| | 4 | 1,53 | 2,65 | 2,65 | 2,57 | 2,42 | 1,22 |

На лобовую часть катушки индуктора сила действует по оси $z$ и на единицу длины $F_z$=16,4 кН/м [вычисление по формуле, аналогичной (2), только вместо элементов тока используются токовые ячейки расчетной сетки в сечении катушки].

Используя МП обмотки индуктора и вычисляя его воздействие на токи в секциях ОЯ, получаем тяговое усилие $F_т=\sum F_x$, равное 9 кН.

Значения магнитных потоков в обмоточном слое статора (на единицу длины сторон обмоток, мВбм), вычисленные по формуле (3) на участках по ширине в направлении оси $x$ (рис. 1, 3):

влево от катушек . . . . . 32,1
над первой основной катушкой . . . 153,7
над второй основной катушкой . . . 162,6
над вспомогательной катушкой . . . 50,3
вправо от катушек . . . . . 9,42

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Индуктивные параметры катушек индуктора, полученные расчетом их индивидуальных МП, указаны в табл. 3. Просуммировав таблицу построчно, справа получили столбец результирующих индуктивностей катушек с учетом влияния двух других. Просуммировав числа в столбце, имеем результирующую индуктивность обмотки индуктора в целом.

*Таблица 3*

| Номер катушки | Индуктивные параметры катушек, мГн | | | Результирующая индуктивность, мГн |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 3,47 | 0,25 | -0,07 | 3,65 |
| 2 | 0,25 | 3,47 | 0,09 | 3,81 |
| 3 | -0,07 | 0,09 | 1,23 | 1,25 |
| Вся обмотка индуктора | | | | 8,71 |

В табл. 4 приведены рассчитанные и измеренные индуктивные параметры секций ОЯ. Секция № 1 — секция-индуктор, возбуждавшая МП при расчете и питаемая током при эксперименте. Остальные — секции-приёмники, по которым проводилось суммирование по формуле (4) или измерялось напряжение $U_M$. Расположение секций соответствует рис. 1, и их сдвиг друг относительно друга по оси $x$ составлял 3 см. Заниженные расчетные значения $M$ в близко лежащих секциях объясняются неучетом связей лобовых частей, которые проявляются именно здесь. По мере удаления секций (увеличение номера в табл. 5) сходимость результатов расчета и эксперимента улучшается, так как реально связывающее секции магнитное поле замыкается примерно на длине сердечника $l_c$, что фактически и учитывалось при расчете.

**В заключение** можно констатировать, что в условиях магнитной системы с двусторонним протяженным сердечником и равномерным зазором метод зеркальных отображений является эффективным инструментом расчета магнитного поля и целого ряда электродинамических параметров на его основе.

*Таблица 4*

| Номер секции | Индуктивные параметры секций обмотки якоря, мкГн, при расположении секций по отношению к секции-индуктору | |
|---|---|---|
| | на общей стороне статора | на противоположной стороне статора |
| 1 | 23,9/— | 15,7/13,4 |
| 2 | 18,0/22,8 | 14,9/12,8 |
| 3 | 14,5/16,4 | 13,0/11,1 |
| 4 | 11,7/12,1 | 10,6/8,9 |
| 5 | 8,9/8,3 | 8,2/6,6 |
| 6 | 6,2/5,1 | 5,8/4,4 |
| 7 | 3,2/2,0 | 3,4/2,2 |
| 8 | 0,5/1,6 | 1,2/0,4 |
| 9 | -3,7/-5,6 | -0,4/-1,4 |

Примечания. 1. В числителе указаны расчетные величины, в знаменателе — экспериментальные. 2. Для секции № 1 указана индуктивность, для остальных — взаимоиндуктивность с секцией № 1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Козаченко Е.В.** Линейные тяговые электродвигатели. — М.: Информэлектро, 1984.
2. **Свечарник Д.В.** Линейный электропривод. — М.: Энергия, 1979.
3. **Данько В.Г.** Естественная коммутация вентильной машины постоянного тока. — Вестн. Харьковского политехнич. ин-та. Электромашиностроение и автоматизация пром. предприятий 1992, 14. вып. 16.
4. **Вольдек А.И.** Электрические машины. — Л.: Энергия, 1978.
5. **Милых В.И.** Метод плоско-ортогональных расчетных моделей со сложной электромагнитной структурой. — Изв. вузов. Электромеханика, 1987, № 11.
6. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники. — М.:Высшая школа, 1973.
7. **Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В.** Электромагнитные поля и волны. — М.: Советское радио, 1971.
8. **Демирчян К.С., Чечурин В.Л.** Машинные расчеты электромагнитных полей. — М.: Высшая школа, 1986.
9. **Милых В.И.** Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин. — Электротехника, 1982, № 12.
10. **Милых В.И.** Расчет электромагнитного поля в продольном сечении электрической машины. — Электротехника, 1984, № 12.


*[15.11.93]*

*Автор: **Милых Владимир Иванович** окончил электромашиностроительный факультет Харьковского политехнического института (ХПИ) в 1972 г. В 1978 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование электродинамических параметров мощного криодвигателя постоянного тока с немагнитным активным слоем» в том же институте. Доцент кафедры общей электротехники ХПИ (Украина).*

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# Модель гистерезисного электродвигателя при несинусоидальном и несимметричном питании

НИКАНОРОВ В.Б., ОСТАНИН С.Ю., ШМЕЛЕВА Г.А.

*Выработан, обоснован и реализован подход к математическому моделированию электромагнитных процессов в гистерезисном электродвигателе с учетом высших гармонических составляющих магнитного поля. Полученные результаты предназначены для реализации автоматизированного исследования с учетом высших гармонических составляющих магнитного поля электромагнитных процессов в гистерезисных электродвигателях, работающих от источников несинусоидального и несимметричного питания.*

Ключевые слова: *гистерезисный электродвигатель, электромагнитные процессы, моделирование*

*The idea of electromagnetic processes simulating in hysteresis motor with high magnetic field harmonics account method is designed, proved and realized. The received results are intended to be used for automatic research of electromadnetic processes in hysteresis motors, operated from the sources of non-symmetricakland non-sinusoidal voltages with an account of magnetic field high harmonics.*

Key words: *hysteresis motor, electromagnetic processes, simulating*

Разработка гистерезисных синхронных электродвигателей (ГД) или оценка электромеханических характеристик уже изготовленных двигателей, особенно при характерном для ГД несинусоидальном и несимметричном питании, осложняется отсутствием адекватных математических моделей. В ранее разработанных математических моделях ГД [1, 2] учет влияния несинусоидальности и несимметрии питания на электромагнитные процессы и его электромеханические характеристики базировался на эмпирических закономерностях, справедливых лишь для ограниченного диапазона габаритов, частоты питания, свойств материала ротора. Расширение области применения ГД, требующее разработки двигателей повышенной мощности (до единиц киловатт), использования современных массивных магнитотвердых материалов для ротора, снижает эффективность ранее созданных математических моделей, алгоритмов и методик расчета.

Сложность математического моделирования процессов в ГД обусловлена существенной нелинейностью, гистерезисом и нестабильностью характеристик гистерезисного слоя (ГС) ротора, в связи с чем распределение магнитного поля в ГД существенно несинусоидально как в пространстве, так и во времени. Кроме того, оно зависит от всех предыдущих магнитных состояний каждого элемента ГС, начиная с первоначального намагничивания ротора в пуске [3—5]. Несинусоидальность и несимметрия питания дополнительно усиливают несинусоидальность пространственно-временнóго распределения магнитного поля в ГД [5].

Цель настоящей работы состояла в выработке и обосновании подхода к математическому моделированию электромагнитных процессов в ГД с учетом высших гармонических составляющих магнитного поля и в получении путем реализации указанного подхода электромагнитных характеристик ГД. Для этого выбрана система координат, составлена эквивалентная электрическая схема замещения ГД, получены соотношения для вычисления эквивалентных сосредоточенных параметров ГД и электромагнитных характеристик.

При построении пространственно-временнóго распределения магнитного поля в ГД использована разработанная авторами математическая модель магнитного поля в ГС [5]. Поэтому здесь приняты все допущения модели из [5] и рассматриваются только установившиеся электромагнитные процессы в ГД, что, однако, не исключает возможности исследования неустановившихся режимов, связанных с разгоном ГД и с механическими качаниями ротора, которые можно считать квазистатическими.

Вследствие нелинейности, гистерезиса, нестабильности характеристик материала ГС ротора и их зависимости от предыдущих магнитных состояний ГД обладает существенной магнитной несимметрией. В [6] показано, что несимметричные электрические машины целесообразно моделировать в системе координат $dq$, жестко связанной с осью магнитной несимметрии. При подходе к моделированию ГД с позиций обобщенной теории электрических машин реальная обмотка статора может быть представлена в виде $n$ последовательно соединенных идеальных обмоток, питаемых током одной частоты, каждая из которых выполнена со своим числом полюсов и создает одну из $n$ пространственных гармонических составляющих МДС реальной обмотки статора. Аналогично реальный ротор ГД может быть представлен в виде $n$ роторов, расположенных на одном валу, каждый из которых имеет свое число полюсов и обладает одной из $n$ простран-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ственных гармонических составляющих остаточной индукции реального ротора.

Такой подход к моделированию ГД допустим только тогда, когда распределение магнитного поля в ГД строится подобно модели из [5] по результирующим значениям индукции (потока) и напряженности (МДС). Например, по распределению результирующей МДС обмотки статора с учетом всех предыдущих магнитных состояний ГС строится распределение результирующей индукции в ГС и только затем выполняется гармонический анализ распределений результирующих индукции и МДС магнитного поля в ГД. По гармоническим составляющим, как показано ниже, вычисляются эквивалентные сосредоточенные параметры ГД.

Графической интерпретацией предлагаемого подхода к моделированию высших пространственных гармонических составляющих магнитного поля в ГД в системе координат $dq$ является эквивалентная электрическая схема замещения ГД при идеальном питании (рис. 1), в основу которой положена схема замещения идеализированного ГД [4]. По аналогии с этой схемой основной гармонической составляющей остаточной индукции ГС на рис. 1 поставлена в соответствие ЭДС $E_{rrq11}$, направленная по оси $q$, так как вектор остаточной индукции направлен по оси $d$. Кроме того, схема замещения на рис. 1 содержит источники ЭДС вращения, наводимых в обмотке статора — $E^s_{\omega q1}$, $E^s_{\omega d1}$ и в роторе — $E^r_{\omega q11}$, $E^r_{\omega d11}$, ..., $E^r_{\omega q1n}$, $E^r_{\omega d1n}$ (здесь и далее первый цифровой индекс — порядковый номер временно́й гармонической составляющей, а второй индекс 1, ..., $n$ — порядковый номер пространственной гармонической составляющей).

В схему замещения на рис. 1 также входят: $r^s$ — резистивный элемент, эквивалентный активному сопротивлению обмотки статора; $x^s_\sigma$ — индуктивный элемент, эквивалентный части проводимости рассеяния обмотки статора, не зависящей от состояния магнитной цепи; индуктивные элементы, эквивалентные проекциям на оси $d$ и $q$ векторов 1-х во времени и $n$-х в пространстве гармонических составляющих следующих магнитных потоков: рассеяния в потоковыравнивающей втулке — $x^{вт}_{\sigma d1n}$, $x^{вт}_{\sigma q1n}$; взаимной индукции между обмоткой статора и ГС ротора — $x^{б}_{d1n}$, $x^{б}_{q1n}$; остаточной намагниченности ГС (реакции якоря ГД) — $x^r_{\mu d1n}$, $x^r_{\mu q1n}$; рассеяния с ротора — $x^r_{\sigma d1n}$, $x^r_{\sigma q1n}$.

На рис. 1 показаны проекции на оси $d$ и $q$ вектора напряжения питания ($U^s_{d1}$, $U^s_{q1}$) и тока в обмотке статора ($I^s_{d1}$, $I^s_{q1}$); токов, эквивалентных МДС намагничивающего контура ($I^б_{d11}, I^б_{q11}, ..., I^б_{d1n}, I^б_{q1n}$); МДС ГС ротора ($I^r_{d11}, I^r_{q11}, ..., I^r_{d1n}, I^r_{q1n}$).

При расчете по распределению результирующей МДС обмотки статора строятся распределения индукции и напряженности результирующего магнитного поля в ГД, а затем выполняется гармонический анализ полученных распределений [5]. Поэтому полная эквивалентная электрическая схема замещения ГД с учетом и пространственных и временны́х высших гармонических составляющих магнитного поля имеет вид, показанный на рис. 2. По структуре и обозначениям эквивалентных сосредоточенных параметров эта схема аналогична схеме замещения ГД при идеальном питании (рис. 1) и представляет собой набор (совокупность) схем по рис. 1 для всех $k$-х временных гармонических составляющих, т. е. для всех $k=1,2,...,l$. Необходимо учитывать, что эквивалентные сосредоточенные параметры ГС $x^r_{\mu d1n}$, $x^r_{\mu q1n}$, $x^r_{\sigma d1n}$,

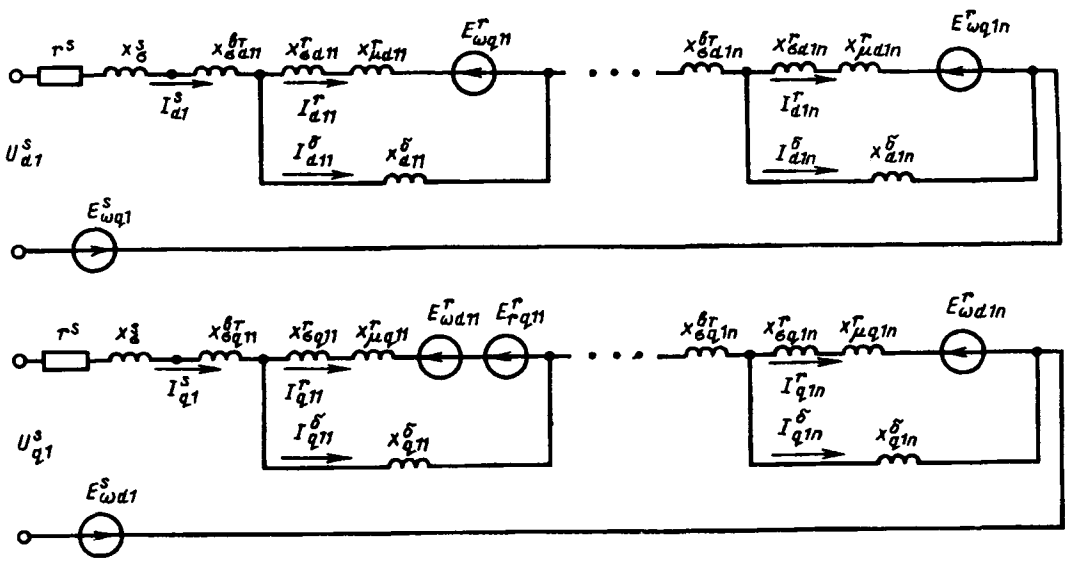



**Рис. 1**

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

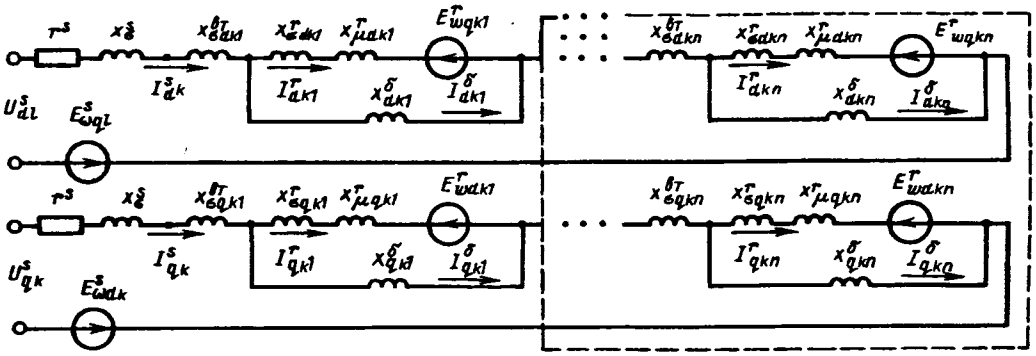


Рис. 2

$x^r_{\sigma q1n}$ $(n=1, 2, ..., n)$ нельзя автоматически заменять на $x^r_{\mu dkn}$, $x^r_{\mu qkn}$, $x^r_{\sigma dkn}$, $x^r_{\sigma qkn}$ ($k=1, ..., l$ — порядковый номер временнóй гармонической составляющей), соответствующие $k$-й временнóй гармонической составляющей, так как в случае наличия хотя бы одной $k$-й высшей гармонической составляющей перемагничивание ГС ротора в синхронном режиме работы происходит по частным циклам и магнитные проницаемости точек ГС имеют совсем иные значения по сравнению со случаем только 1-й временнóй гармонической.

Активное $r^s$ и индуктивное $x^s_\sigma$ рассеяния сопротивления обмотки статора рассчитываются по формулам, известным из общей теории электрических машин [7]. В случае использования потоковыравнивающей втулки (индекс «вт») эквивалентные ей сосредоточенные параметры, зависящие от текущего магнитного состояния магнитной цепи, определяются по следующим соотношениям:

$$x^{\text{вт}}_{\sigma dkn} = C^{\text{вт}} \frac{B^{\text{вт}}_{\sigma dkn}}{H^{\text{вт}}_{\sigma dkn}}; \quad x^{\text{вт}}_{\sigma qkn} = C^{\text{вт}} \frac{B^{\text{вт}}_{\sigma qkn}}{H^{\text{вт}}_{\sigma qkn}};$$
$$C^{\text{вт}} = 2\pi f k \frac{wS^{\text{вт}}}{l^{\text{вт}}_n}, \qquad (1)$$

где $f$ — частота напряжения питания; $w$ — число витков обмотки статора; $S^{\text{вт}}$ — площадь поперечного сечения, $l^{\text{вт}}_n$ — длина средней силовой линии для $n$-й пространственной гармонической магнитного поля в потоковыравнивающей втулке; $B^{\text{вт}}_{\sigma dkn}$, $B^{\text{вт}}_{\sigma qkn}$, $H^{\text{вт}}_{\sigma dkn}$, $H^{\text{вт}}_{\sigma qkn}$ — проекции на оси $d$ и $q$ векторов $k$-х во времени и $n$-х в пространстве гармонических составляющих индукции и напряженности в потоковыравнивающей втулке, определяемые с помощью математической модели магнитного поля в ГД [5].

Для воздушного зазора (индекс «$\delta$») эквивалентные сосредоточенные параметры равны:

$$x^\delta_{dkn} = C^\delta \frac{1}{k_d\delta + \dfrac{F^a_{dkn} + F^z_{dkn} + F^к_{dkn} + F^{\text{вт}}_{kn}}{1{,}6\cdot 10^4 B^\delta_{dkn}}};$$
$$x^\delta_{dkn} = C^\delta \frac{1}{k_d\delta + \dfrac{F^a_{dkn} + F^z_{dkn} + F^к_{dkn} + F^{\text{вт}}_{kn}}{1{,}6\cdot 10^4 B^\delta_{dkn}}}; \qquad (2)$$

$$C^\delta = 2{,}5\cdot 10^{-8}\, m\,(k_{wn}w)^2 fk \frac{(d_3 \pm 2\delta)\, l_1}{(np)^2},$$

где $m$, $k_{wn}$ — число фаз и обмоточный коэффициент обмотки статора; $d_3$ — диаметр поверхности ротора, обращенной к статору; $\delta$ — воздушный зазор; $l_1$ — длина статора; $p$ — число нар полюсов; $k_d$ — коэффициент учета пазовости (коэффициент Картера); $F^a_{dkn}$, $F^a_{qkn}$, $F^z_{dkn}$, $F^z_{qkn}$, $F^к_{dkn}$, $F_{кqkn}$, $F^{\text{вт}}_{dkn}$, $F^{\text{вт}}_{qkn}$ — падения МДС по осям $d$ и $q$ от $k$-й во времени и $n$-й в пространстве гармонических составляющих магнитного поля в ярме (индекс «а»), в зубцах («z»), в коронках зубцов «к», в потоковыравнивающей втулке («вт»), определяемые с помощью математической модели магнитного поля в ГД [5]; $B^\delta_{dkn}$, $B^\delta_{qkn}$ — проекции на оси $d$ и $q$ вектора $k$-й во времени и $n$-й в пространстве гармонических составляющих индукции в воздушном зазоре, также определяемые с помощью модели из [5]. В (2) и последующих формулах верхний знак в составных знаках вида «±» относится к обращенному исполнению ГД (ОИ), а нижний знак — к нормальному (НИ).

Для потока рассеяния ГС ротора эквивалентные сосредоточенные параметры равны:

$$x^r_{\sigma dkn} = x^r_{\sigma qkn} = \frac{4m\,(k_{wn}w)^2 fk}{np} 0{,}4\pi\, 10^{-8} \times$$
$$\times \left(k_{Gц}\, 2l_2 \pm k_{Gт}\frac{4}{\pi}\Delta + k_{Gр}\, 0{,}26 d_2\right), \qquad (3)$$

где $k_{Gц}$, $k_{Gт}$, $k_{Gр}$ — коэффициенты, учитывающие увеличение рассеяния за счет близлежащих магнитных масс для цилиндрической поверхности ротора, торцов и ребер соответственно; $l_2$, $\Delta$, $d_2$ — длина, толщина и внутренний (для НИ) или наружный (для ОИ) диаметр ротора.

Для ГС ротора эквивалентные сосредоточенные параметры равны:

$$x^r_{\mu dkn} = C^r_\sigma \frac{B^r_{dkn}}{H^r_{dkn}}; \quad x^r_{\mu qkn} = C^r_\sigma \frac{B^r_{qkn}}{H^r_{qkn}};$$
$$C^r_s = \frac{4m\,(k_{wn}w)^2 fkS^r}{npl_{rn}}; \qquad (4)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где $S^r$ — площадь поперечного сечения ГС; $l_n^r$ — длина средней силовой линии для $n$-й пространственной гармонической магнитного поля в ГС; $B_{dkn}^r$, $B_{qkn}^r$, $H_{dkn}^r$, $H_{qkn}^r$ — проекции на оси $d$ и $q$ векторов $k$-х во времени и $n$-х в пространстве гармонических составляющих индукции и напряженности ГС ротора, определяемые с помощью математической модели магнитного поля в ГД [5].

ЭДС, эквивалентная основной гармонической составляющей остаточной индукции ГС, определяется по соотношению

$$E_{rq11}^r = 4{,}44\, B_{rd11}^r\, k_{w1}\, wfS^r. \qquad (5)$$

Основная (базовая) система координат $dq$ связана с вектором первой во времени и в пространстве гармонической составляющей остаточной индукции ГС ротора. А модель магнитных процессов в ГС [5] удобно было построить в системе координат, жестко связанной с телом ротора. Поэтому необходимо преобразование координат для процессов в роторе при расчете ГД в целом. Начальные угловые смещения систем координат $d_k q_k$ относительно системы $dq$ равны начальным фазам векторов $k$-х гармонических составляющих остаточной индукции в роторе: $\varphi_n = \varphi_{bkn}$.

Для учета любой $n$-й высшей гармонической магнитного поля в ГД по каждой $k$-й временно́й гармонической питания соответствующие векторы индукции и напряженности проектируются на векторы $k$-х во времени и $i$-х в пространстве гармонических составляющих индукции в роторе. Это проецирование сводится фактически к вычитанию соответствующих начальных фаз векторов. Следует отметить, что так как амплитуда $k$-й временно́й гармонической индукции в ГС ротора в $k$ раз меньше в относительных единицах амплитуды $k$-й гармонической напряжения [1], то амплитуды индукции и напряженности любого магнитного поля от $k$-й ($k>1$) во времени и $n$-й ($n>1$) в пространстве гармонической будут малы и в общем алгоритме расчета электромеханического преобразования энергии в ГД такие гармонические можно не учитывать. В этом случае части схемы, охваченной на рис. 2 штриховой линией, не будет.

В общем случае несимметричного и несинусоидального питания эквивалентная электрическая схема замещения ГД по структуре аналогична приведенной на рис. 2, но каждой временно́й гармонической составляющей напряжения питания соответствуют не два фрагмента, отражающие проецирование ее вектора на оси $d$ и $q$, а $2m$ фрагментов для проекций на эти оси векторов $m$ симметричных последовательностей указанной гармонической.

Рассмотренная модель ГД реализована на ЭВМ. Для оценки ее адекватности использованы результаты экспериментального исследования влияния высших гармонических составляющих магнитного поля в роторе на электромагнитный момент и механическую характеристику макетов ГД [8]. В [8], чтобы получить экспериментальные зависимости, был разработан источник на основе стандартных модулей (усилителей мощности и генераторов сложного напряжения), позволяющий изменять в широких пределах как гармонический состав (от 0 до 300%) высших гармонических составляющих магнитного поля, так и фазовый сдвиг между ними (обеспечивающий прямое или обратное вращение высших гармонических). Индукция в воздушном зазоре и роторе определялась с помощью набора измерительных катушек.

Гармонический состав измерительных сигналов контролировался анализатором гармонических.

Экспериментальные исследования при несимметричном питании проводились на двухфазных ГД [8], в которых разная степень эллиптичности магнитного поля в роторе создавалась изменением амплитуд и временно́го сдвига фазных напряжений.

Для оценки адекватности модели ГД сопоставлены результаты расчетов и экспериментов, проведенных на макетах из [8]. Примеры сопоставительного анализа иллюстрируются графиками, построенными в относительных единицах на рис. 3—5, где сплошными линиями показаны расчетные зависимости, а пунктирными — экспериментальные. По осям ординат отложены относительные значения электромагнитного момента $m$, причем в качестве базового принят момент при идеальном питании соответствующего ГД. На рис. 3 по оси абсцисс отложены значения процентного содержания ($\gamma$) третьей временно́й гармонической составляющей напряжения питания; цифрой *1* обозначены зависимости для прямых гармонических, цифрой *2* — для обратных. На рис. 4 по оси абсцисс отложены значения скольжения ротора $s$ относительно первой гармонической составляющей магнитного поля статора, в напряжении питания которого кроме первой содержится третья прямая (рис. 4) гармоническая составляющая.

На рис. 5 приведены механические характеристики ГД при разной степени несимметрии напряжения питания и соответственно при разной степени эллиптичности магнитного поля ротора. Степень эллиптичности характеризуется коэффициентом эллиптичности $k_{эл}$, который в данном случае определяется как отношение напряжений (или ЭДС) на фазах двухфазного ГД.

Исследования показывают, что расхождение расчетных и экспериментальных характеристик

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

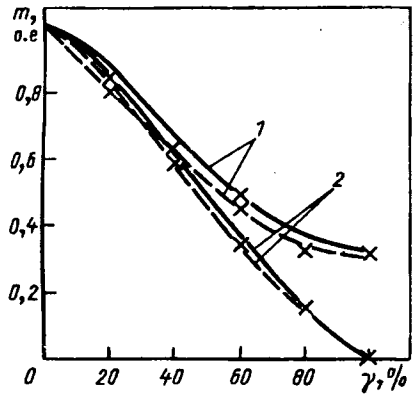



Рис. 3

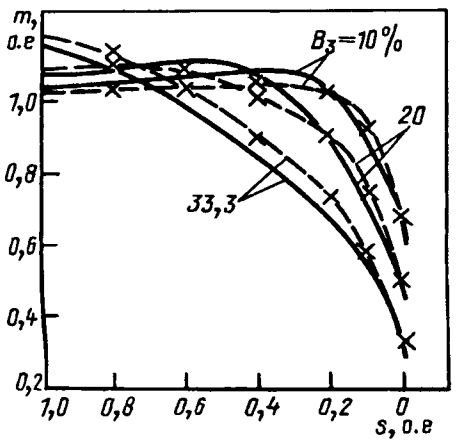



Рис. 4

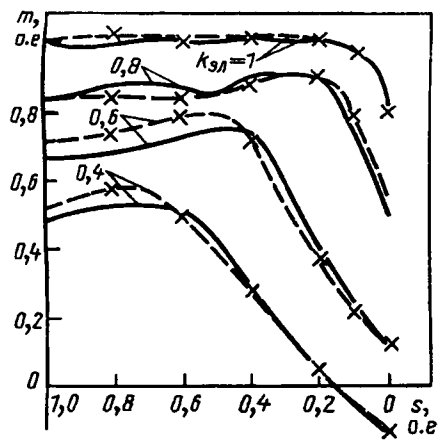



Рис. 5

не превышает 15% даже при очень высоком процентном содержании высших гармонических составляющих напряжения питания (до 100%) и при очень сильной несимметрии напряжения по фазам ($k_{эл}$ до 0,4). Разработанная система программ включена как составная часть в программную систему расчета характеристик ГД, с помощью которой спроектированы ГД для конкретных электроприводов роторных и центрифужных технологий [9]. Все это свидетельствует о достаточно высокой адекватности разработанных моделей и программных средств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мастяев Н.З., Трегубов В.А.** Влияние высших гармоник на синхронный момент в электромагнитную мощность гистерезисного двигателя. — Электричество, 1978, № 7.

2. **Ланген А.М.** Теория идеального гистерезисного двигателя. — Электричество, 1969, № 6.

3. **Делекторский В.А., Орлов И.Н., Черняева О.М.** Математическая модель линейного перемагничивания магнитотвердого материала. — Изв. вузов. Электромеханика, 1980, № 9.

4. **Шмелев Г.А.** Метод расчета электромеханических процессов в гистерезисных двигателях. — В кн.: Межвуз. сб. тр., № 14. — М.: МЭИ, 1983.

5. **Никаноров В.В., Останин С.Ю., Шмелева Г.А.** Математическая модель магнитного поля в гистерезисном электродвигателе. — Электричество, 1995, № 12.

6. **Коненко Е.В., Сипайлов Г.А., Хорьков К.А.** Электрические машины. — М.: Высшая школа, 1975.

7. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины: Учебник для вузов. — М.: Энергия, 1980.

8. **Делекторский В.А., Никаноров В.В., Орлов И.Н.** Особенности проявления высших гармоник питания в гистерезисном двигателе. — Электротехника, 1972, № 8.

9. **Создание** рядов синхронных вентильных электроприводов для роторных и центрифужных технологий / В.Н. Тарасов, С.Ф. Позднухов, В.П. Ларин и др. — Электротехника, 1995, № 1.

*[04.04.95]*

*Авторы:* ***Никаноров Вадим Борисович*** *окончил электромеханический факультет (ЭМФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1964 г. В 1972 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию на тему «Нестабильность электромеханических характеристик гироскопических двигателей». Доцент кафедры электротехники и электроники Московской государственной академии печати (МГАП).*

***Останин Сергей Юрьевич*** *окончил ЭМФ МЭИ в 1987 г. В 1993 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка математической модели и алгоритмов расчета гистерезисного электродвигателя с учетом высших гармонических составляющих магнитного поля и вихревых токов». Старший научный сотрудник кафедры энергоснабжения и электрооборудования летательных аппаратов МЭИ.*

***Шмелева Галина Алексеевна*** *окончила ЭМФ МЭИ в 1971 г. В 1983 г. в МЭИ защитила кандидатскую диссертацию на тему «Разработка и реализация на ЭВМ математической модели гистерезисного двигателя». Доцент кафедры электротехники и электроники МГАП.*

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# Объектно-ориентированный подход к проектированию электромеханических систем

ВОДОВОЗОВ В.М., ВОДОВОЗОВА Е.В., ЦВЕТИКОВ Е.А.

*Выделены плохо формализуемые задачи, связанные с проектированием электромеханических систем. Предложены объектно-ориентированные программные средства автоматизации решения таких задач. Приведены результаты проектирования, опирающиеся на гипертекстовую систему «ToolBook» и визуальный программный комплекс «LabVIEW».*

Ключевые слова: *электромеханические системы, проектирование, программные средства*

*Poorly formalistic problems of electromechanical systems design have been marked. The object-oriented software for automation of the problems decision have been prepared. New results of design on the base of hypertext system «ToolBook» and visual software «LabVIEW» have been described.*

Key words: *electromechanical systems, design, automationprogramm control*

Традиционно проблемы проектирования и реализации сложных промышленных электромеханических систем решаются раздельно проектно-конструкторскими и монтажно-эксплуатационными организациями. Но в последнее время широкое развитие получает комплексное решение этой проблемы. Соответственно формируется и потребность в новом инструментарии — универсальных системах проектирования и реализации электромеханических систем. Производительность проектирования электромеханических систем, их качество и надежность в условиях такого универсального единичного и мелкосерийного производства удается повысить с помощью рассмотренных ниже объектно-ориентированных средств.

Проектирование электромеханической системы выполняется с целью создания технических и программных средств, обеспечивающих воспроизведение заданных движений рабочих органов манипуляционной системой станка, робота, бытовой или технологической установки. Состояние рабочих органов выражается обычно функцией, учитывающей наблюдаемое состояние среды и управления, а также ненаблюдаемые возмущения. Область определения подобной функции состояния зависит от множества энергетических, силовых, конструктивных ограничений. Оптимальное проектирование представляет собой процесс определения структуры и параметров системы, которые экстремизируют цель проектирования при соблюдении наложенных ограничений. С учетом нелинейности, нестационарности и неоднородности функции состояния оптимальное проектирование электромеханической системы обычно относят к многокритериальным (векторным) задачам нелинейного программирования, а цель проектирования считается достигнутой, если в ходе его удается определить структуру и найти энергетические и информационные параметры ее компонент.

Решение указанных задач — структурного и параметрического синтеза, с одной стороны, и энергетического и информационного синтеза, с другой, обычно выполняется по типовой технологической схеме, согласно которой во всех случаях — будь то металлургические агрегаты или общепромышленные механизмы, роботы или станки — поиск оптимального решения представляет собой рекурсивный процесс. Вначале выполняют энергетический расчет и выбирают оборудование, затем, задаваясь базовой структурой, решают параметрические задачи синтеза. После этого оценивают эффективность найденного решения и при необходимости переходят к исследованию других объектов и структур, используя при этом ранее полученные результаты.

В общей последовательности проектирования и реализации можно выделить задачи двух типов. К первому относятся хорошо формализованные к настоящему времени и подробно описанные в литературе задачи, связанные с энергетическим расчетом системы, синтезом регуляторов, моделированием отдельных узлов. Задачи второго типа отличаются сложностью формализации, вследствие чего большинство их решений носит скорее инструктивный характер и описывается достаточно сложными алгоритмами с использованием таких механизмов, как списки, очереди, деревья. В число подобных задач входят выбор оборудования, структурный синтез, планирование эксперимента и обработка его результатов, а также большинство проблем реализации электромеханических систем.

В предлагаемой статье представлены результаты разработки новых подходов к решению задач выбора оборудования и моделирования промышленной системы в целом.

**Выбор оборудования в диалоговом режиме.** Пытаясь формализовать этап выбора оборудования, следующий за традиционным энергетическим расчетом, авторы в первую очередь реализовали поэтапную декомпозицию дерева ре-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

шений посредством организации рекуррентной процедуры перехода от одного приближения к другому с некоторым шагом, зависящим от ситуации в очередной точке поиска и его алгоритма, регламентирующего процесса оптимизации.

Вследствие векторного характера критерия совместная оптимизация его компонент выполнялась на этом этапе «вручную» в соответствии с возможностями и профессиональными навыками проектировщика. Поиск решения проводился на множестве реляционных баз данных, предварительно подготовленных для этой цели. В специально разработанной системе управления базами данных (СУБД) проектировщику предоставлялась возможность выбрать тип электродвигателя, наложить ограничения, оценить результат и сделать выбор или повторить запрос при иных начальных условиях. Затем он накладывал ограничения на множество механических передач и преобразователей мощности и осуществлял поиск в соответствующих базах данных, подбирая оптимальные комплекты.

Такой подход традиционен для большинства проектных организаций, располагающих богатым опытом принятия проектных решений на основе обширных компьютерных баз данных, пришедших в последние годы на смену многочисленным архивам каталогов и «впитавших» их содержание и структуры [1].

**Реляционная СУБД для выбора оборудования.** Развитие технологии нелинейного математического программирования, опирающейся на интеллектуальную мощь ЭВМ, привело к более эффективным алгоритмам оптимизации [2].

На первом этапе проектирования формируется пространство критериев, размерность которого определяется числом критериев. В нем рассчитывается множество параметров электромеханической системы: рабочие усилия, моменты сопротивления и инерции и т. п. С помощью имеющихся в среде проектирования реляционных баз данных электродвигателей, механических передач и преобразователей мощности выбираются сочетания параметров, оптимальные с точки зрения частных или комплексных критериев: массогабаритных, технико-экономических, динамических и т. п. Область допустимых состояний среды при этом отображается в определенную область пространства критериев, формируя множество Парето, содержащее все решения многокритериальной задачи.

На втором этапе многокритериальная задача сводится к однокритериальной на основе использования дополнительной информации, полученной в результате статических и динамических расчетов различных структурных вариантов проектируемой системы средствами компьютерного эксперимента. В процессе моделирования задаются разнообразные входные сигналы, возмущения в виде переменных моментов сопротивления и инерции, колебаний напряжения или отклонений параметров от расчетных значений.

В развитие данного направления была создана интерактивная среда проектирования электромеханических систем на базе системы программирования «Matlab» фирмы «Mathworks» и реляционной СУБД «Paradox» корпорации «Borland».

Вычислительная система-интерпретатор «Matlab» используется для проведения энергетического и механического расчета усилий, моментов и мощностей механизмов манипуляционной системы. Все исходные выражения для расчета, сопровождаемые комментариями, доступны пользователю и при желании могут быть им исправлены, упрощены или дополнены. Диалоговый блок исходных данных заполняется проектировщиком сведениями о механизмах объекта, для которого разрабатывается электромеханическая система. Результаты расчета подвергаются семантическому анализу и при необходимости интерпретируются в табличной или графической форме и выводятся в текстовый файл в виде законченного документа.

По завершении расчета механической части системы запускается исполнительная программа СУБД «Paradox». Она обрабатывает текстовой файл пакета «Matlab» и предоставляет доступ проектировщику к записям об электродвигателях, редукторах и преобразователях мощности, способных после объединения их в электромеханическую систему приводить в движение заданные механизмы (рис. 1).

Поиск сведений о двигателях выполняется в шести базах данных (машины переменного тока с фазным ротором, многоскоростные и общепромышленные; машины постоянного тока высокомоментные, малоинерционные и общепромышленные) с использованием механизма «запросов на примере». Каждой из найденных машин может быть поставлено в соответствие конечное множество редукторов шести типов (зубчатые, червячные, шариковинтовые, планетарные, рейка-шестерня, ременные), и преобразователей мощности трех типов (тиристорные и транзисторные выпрямители и инверторы). Базы данных открыты для коррекции и пополнения. Промышленные каталоги, которыми располагает проектировщик, могут при необходимости быть им превращены в электронные справочники и ранжированы по любому из полей.

Разработчик волен делать запросы к полному множеству объектов без данных либо ограничить его определенными характеристическими свойствами. Чем больше таких ограничений, тем

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

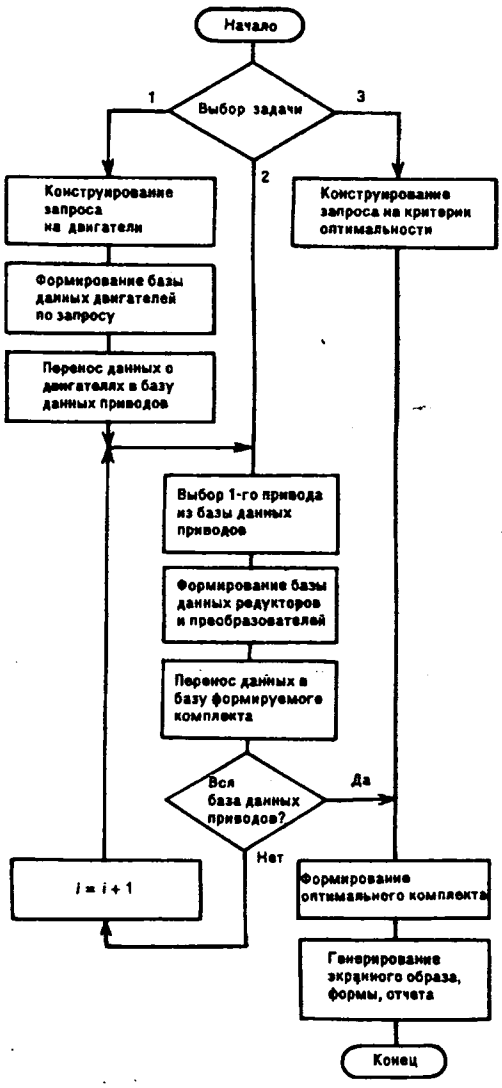



**Рис. 1**

сложнее задача подбора комбинаций «двигатель—преобразователь—редуктор», но тем полнее удовлетворяются требования проекта. Возможен и иной подход, в соответствии с которым, исходя из оценки усилий в механизме, сразу же выбираются возможные типы механических передач, их коэффициенты и прочие характеристики, после чего подбираются электродвигатели и преобразователи.

В отличие от алгоритма выбора оборудования в диалоговом режиме проектировщик здесь не обязан постоянно следить за ходом решения и участвовать в нем. Он может заранее сформулировать свои требования и критерии, наложить ограничения и установить порядок следования этапов, после чего использовать программу в режиме автоматической оптимизации, в ходе которой система сама подбирает механические передачи и преобразователи мощности к выбранным электродвигателям.

Какой из найденных комплектов считать оптимальным? Отвечая на этот вопрос, проектировщик формирует соответствующие критерии и ранжирует их. Это может быть критерий максимальной добротности, точности или быстродействия, минимальной массы или инерционности, высочайшей жесткости и т. п. Таким образом, набирается целая гамма электромеханических комплектов, из которых делается выбор на основе суждений о предпочтении того или иного критерия.

В рассмотренном решении удалось избежать строгой последовательности действий, характерной для ранее применявшихся систем. Алгоритм на рис. 1 представляет собой разновидность сетевой структуры со свободными переходами к любому этапу или повторению при иных начальных условиях.

Интегрированная в систему автоматизированного проектирования, описанная среда для расчета и выбора оборудования способствовала повышению эффективности и гибкости конструирования. Информация о выбранном оборудовании автоматически оформлялась в таком виде, чтобы ее сразу же можно было использовать в моделирующих комплексах для настройки и оптимизации информационной части системы.

**Гипертекстовая система выбора оборудования.** Рассмотренная система обладает рядом недостатков. Дело в том, что выбор оборудования, особенно в условиях небольших кратковременных заказов, выполняется крайне редко, в ряде организаций — один-два раза в год и реже. Требования же к такой процедуре чрезвычайно высоки и выбирать приходится лучшее из того, что предлагает промышленность. В то же время, создание и поддержание в актуальном состоянии реляционных баз данных требует все бо́льших и бо́льших удельных затрат в общем цикле проектирования. Новые модели двигателей, редукторов и преобразователей все сильнее различаются своими характеристиками, все меньше соответствуют ранее определенным структурам баз данных, требуя переработки существующих схем информационного обеспечения.

В связи с этим предлагается новая технология поиска эффективных технических решений в области электромеханики. Она базируется на отходе от традиционных реляционных моделей данных в пользу сетевых объектно-ориентированных решений. Разработанная нами программная система, реализованная в среде гипертекстовой оболочки «ToolBook» («Asymetrix»), выполняет поиск оборудования по заданным ключевым выражениям не в специально подготовленных реляционных средах, а в обычных текстовых файлах на многочисленных накопителях информации, а

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

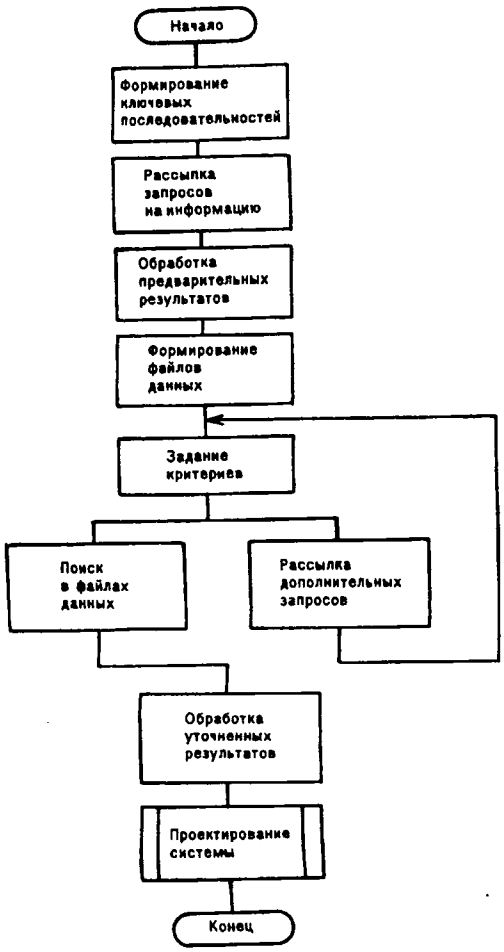



Рис. 2

при необходимости — и в вычислительных сетях (рис. 2).

Современные развитые информационно-поисковые системы помогают интегрировать информацию, фактически распределенную по многим компьютерам. Например, информационно-поисковая система «Gother» фирмы «INTERNET Gother Developers» предлагает пользователю с помощью иерархического меню указать интересующий его материал, например, статью из журнала. Вслед за этим «Gother» отыскивает «компьютер-библиотеку» с этим журналом и предоставляет копию запрошенной статьи. Информационные серверы WAIS (Wide Area Information Server) ряда американских корпораций обеспечивают поиск информации по ключевым словам или текстовым фрагментам, а «всемирная паутина» WWW (World Wide Web) института GERN в Швейцарии основана на гипертекстовом представлении данных. Заказанный текст поставляется в WWW оформленным на полиграфическом уровне с репродукциями, аудио- и видеофрагментами, ссылками на другие документы.

**Объектно-ориентированный подход.** Главное достоинство предлагаемого гипертекстового информационно-поискового подхода заключается в его объектной ориентированности, характерные черты которой — инкапсуляция, полиморфизм и наследование.

Благодаря применению механизма инкапсуляции удалось подойти к технологии, объединяющей многомерные массивы данных, хранящихся в последовательных и сетевых структурах различных форматов, с алгоритмами поиска, вычленения заданных текстовых фрагментов и упорядочения их по заданным критериям с формированием целевых массивов.

Благодаря механизму полиморфизма задача выбора оборудования была трансформирована в задачу поиска прототипов в самых различных хозяйственных сферах. Например, при создании агрегатов для взвешивания такой подход позволил использовать опыт металлургии и сельского хозяйства, бумагоделательного производства и медицины.

Реализация механизма наследования связана с разработкой средств преобразования прототипов и применения одних и тех же методов и инженерных решений, обнаруженных в смежных отраслях, в заданной прикладной области. Инструменты наследования обеспечили масштабирование, приведение к требуемым условиям работы, энергетическим и эргономическим показателям. С их помощью найденные описания электромеханического оборудования выделяются с целью проведения углубленного поиска по уточненным, более конкретным критериям. Эффективные поисковые алгоритмы и программы, созданные на базе визуального объектно-ориентированного языка «Open Script» фирмы «Asymetrix», позволяют периодически детализировать тематику поиска, менять его направленность.

В частности, при разработке вентильного электропривода системы автоматического взвешивания транспорта Гатчинского комбикормового завода в качестве первичного источника информации мы использовали все материалы, заявленные на Международную конференцию по автоматизированному электроприводу (С.-Петербург, 1995 г.), что составляет более 250 документов. Все они были выделены в специальный информационный массив и обработаны системой вторичного поиска с целью уточнения технических и массогабаритных показателей.

Дальнейший поиск выполнялся по каталогам и информационным бюллетеням заводов-изготовителей. При этом в условиях усложнения критериев к техническим требованиям были добавлены экономические и эргономические характеристики, информация по надежности и гаран-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

тийным обязательствам поставщиков.

**Традиционные средства моделирования.** Интересной сферой применения объектно-ориентированной технологии оказалось моделирование электромеханических систем в процессе их проектирования и последующей реализации.

Сегодня в практике моделирования распространены структурно-топологические модели, модели состояния и имитационные модели. Алгоритмы и программы имитации представляют объекты и сигналы проектируемых систем главным образом параметрически, т. е. в виде скалярных разностных уравнений в дискретном времени [3]. Такое описание обладает рядом преимуществ по сравнению с описанием в непрерывном пространстве. В первую очередь, речь идет о высокой степени адекватности модели при отсутствии необходимости линеаризации и аппроксимации. Разностные уравнения, описывающие функционирование дискретных систем, значительно проще с точки зрения их анализа и программной реализации, чем дифференциальные уравнения. Они идентичны при описании линейных, нелинейных, дискретных и нестационарных систем и звеньев. В отличие от частотных и псевдочастотных моделей, использования корневых методов, разностные уравнения позволяют непосредственно, а не косвенно оценивать состояние объекта.

Благодаря разработанным имитационным моделям электромеханических систем удалось, в частности, решить задачу определения зависимости качества переходных процессов, точности и продолжительности позиционирования механизма от периода квантования регуляторов, длительности бестоковой паузы преобразователя мощности, частоты опроса датчиков тока, скорости и уровня фильтрации пульсаций, разрешающей способности датчика положения. Имитационная модель позволила оценить влияние длины машинного слова микроЭВМ и ее быстродействия на характер динамических показателей привода. С ее помощью были построены статические и динамические характеристики системы, определены предельные по быстродействию показатели ускорения двигателей.

**«Виртуальные инструменты» моделирования.** Традиционный подход обладает рядом известных недостатков. Часто модель ограничена одной группой объектов, например информационным каналом, преобразователем и двигателем, что не позволяет оптимизировать всю систему — от оператора до технологического процесса — в целом. Интеграция модельных объектов в единый комплекс обычно ведется достаточно формально, ибо различные элементы моделируются разными средствами, в разном масштабе и с различными допущениями. В связи с этим был сделан переход от имитационных моделей к «виртуальным инструментам», позволяющим постепенно, по мере необходимости модельные объекты заменять реальными без нарушения целостности модели [4].

Примененная в проектировании система «LabVIEW» фирмы «National Instruments» представляет собой комплекс аппаратных, программных, лингвистических и технологических средств анализа, моделирования и управления, ориентированный на локальные объекты в промышленности, образовании, науке. Ее магистральные адаптеры, контроллеры на дополнительных платах, приборы и источники питания, обслуживаемые разнообразными прикладными программами и драйверами, обеспечивают подключение множества автономных устройств: датчиков, реле, измерительных приборов, исполнительных механизмов. В основе «LabVIEW» как моделирующего пакета лежит концепция виртуальной машины: даже при отсутствии внешнего оборудования он позволяет отлаживать программы, оптимизировать рабочие режимы и демонстрировать результаты благодаря богатым библиотекам моделей.

Благодаря объектной ориентации языка «LabVIEW», выраженной в его связности, модульности, иерархичности, каждая реализованная на нем функция была оформлена в виде отдельного объекта, состоящего из других, ранее подготовленных объектов (инкапсуляция), и, в свою очередь, явилась элементом объекта более высокого уровня. Благодаря модульности программисту и пользователю предоставилась возможность раскрыть и запустить в действие любой объект автономно, проанализировать и исследовать его в диалоговом режиме (наследование). Такая иерархичность способствовала постепенному усложнению программ за счет ранее отлаженных модулей. Система взаимосвязанных подобным образом объектов объединена в библиотеки (поли- морфизм), каждая из которых представляет собой отдельный файл. Наряду с созданными библиотеками в системе существуют некоторые первичные, базовые модули, из которых собираются объекты, хранящиеся в системных библиотеках «LabVIEW». Отдельными библиотеками представлены завершенные профессионально разработанные модели источников данных, средств обработки сигналов, фильтров, регуляторов и т. п., обслуживающие виртуальные функции системы.

«LabVIEW» относится к классу языков визуального программирования. В отличие от текстовых языков программа здесь представляется в виде схемы, а интерфейс пользователя имитируется пультом для ввода данных и команд. Каждому объекту был придан свой графический

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

образ (значок) с изменяемыми размерами, формой, положением. Кроме значка, каждый завершенный объект имеет и «обратную сторону» — программный интерфейс с необходимым числом терминалов для объединения его с другими элементами схемы.

Как и в любом непроцедурном языке, в «LabVIEW» не программа управляет данными, а данные — программой. Поэтому созданные нами программные объекты начинают функционировать лишь после поступления данных на все входы, а по завершении работы формируется выходной код сразу на всех выходах. Такой принцип освободил программистов от линейной структуры программ, характерной для традиционных процедурных языков программирования. Благодаря этому данные в рассматриваемых моделях следуют множеством путей и реализуют одновременно несколько операций. Дополнительно ко всему «LabVIEW» является мультизадачной системой, поэтому каждая модель решает одновременно несколько задач, выполняя сразу серию заданий пользователя.

**Выводы.** 1. Границы проблем, решаемых в ходе проектирования электромеханических систем, регулярно изменяются, что закономерно. Многое из того, что еще несколько лет назад не входило в сферу проектирования, сегодня считается актуальной задачей. В первую очередь, это касается автоматизации плохо формализуемых задач нелинейного программирования, рассмотренных в статье. В расширении границ проектирования проявляется полиморфизм проектных решений.

2. Задачи выбора оборудования и синтеза сложных систем автоматизации лучше решаются не с единой позиции, а с разных, порой противоположных. Хорошо, когда при этом используется опыт самых авторитетных мировых фирм, плохо, когда поле зрения разработчика ограничено только своими достижениями. Здесь предложены конкретные средства интегрирования различных технических, технологических и теоретических решений в единый организм; в этом проявляется инкапсуляция проектных решений.

3. Старые, испытанные результаты полезно внедрять в новые проекты как элементы, зерна нового. В данной статье предложен механизм такого внедрения в сферу гипертекста и виртуального проектирования, в котором проявляется наследование проектных решений.

4. Объединение трех названных концепций — полиморфизма, инкапсуляции, наследования — и представляет то, что авторы называют объектно-ориентированным подходом к проектированию электромеханических систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чудненко Е.Б., Кроль Т.Я.** Программа интеллектуальной помощи для выбора комплектных электроприводов. — В кн.: Тезисы докладов к научно-техническому семинару «Современный регулируемый электропривод на основе интеллектуальной силовой электроники и микропроцессорных средств управления», 2—4 февраля 1994 г. М.: 1994.

2. **Водовозов В.М.** Выбор параметров энергетического канала электропривода станков с программным управлением. — Электричество, 1985, № 8.

3. **Водовозов В.М.** Имитационное моделирование систем электропривода. — Электричество, 1991, № 9.

4. **Объектно-ориентированные** средства проектирования и реализации автоматизированных электромеханических систем / В.М. Водовозов, Е.А. Водовозова, А.С. Елец, Е.А. Цветиков. — В кн.: Тезисы докладов I Международной (XII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. СПб, 1995.

*[16.10.95]*

*Авторы:* ***Водовозов Валерий Михайлович*** *окончил энергетический факультет Вологодского политехнического института в 1972 г. В 1979 г. в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (СПГЭТУ) защитил диссертацию, посвященную электроприводу систем программного управления. Доцент кафедры робототехники СПГЭТУ.*

***Водовозова Елена Валериевна*** *окончила факультет корабельной автоматики СПГЭТУ. Аспирант кафедры вычислительной техники СПГЭТУ.*

***Цветиков Евгений Александрович*** *окончил факультет электротехники и автоматизации СПГЭТУ. Аспирант кафедры робототехники СПГЭТУ.*

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# О совместимости преобразователя и двигателя в асинхронном электроприводе

МАЛИНИН Л.И., МАЛИНИН В.И., МАКЕЛЬСКИЙ В.Д., ТЮКОВ В.А.

*На основании исследования волновых процессов при образовании вращающегося поля впервые доказана необходимость подобия амплитудно-частотного спектра пространственного распределения индукции двигателя и амплитудно-частотного спектра временно́го изменения тока преобразователя. Предложены количественные критерии совместимости двигателя и преобразователя.*

Ключевые слова: *волновые процессы, вращающееся поле, преобразователь, асинхронный двигатель, совместимость*

*A new approach to the asynchronous drive design based on the analysis of wave processes in a converter-motor system due rotating fields is introduced. The necessity of the similarity of a motor flux density amplitude-frequency spectrum (space distributed) and a converter current amplitude-frequency spectrum (time-dependent) are shown for first time. The quantitative criteria of the motor and converter compatibility are proposed.*

Key words: *wave processes, potating field, converter, asynchronous motor, compatibility*

**Введение.** Для нормального функционирования двигателей переменного тока необходимо прежде всего создание вращающегося магнитного поля. При этом первым этапом является образование пульсирующего поля одно́й фазы, т. е. стоячей волны. Двигатели, выпускаемые промышленностью, конструируются таким образом, чтобы обеспечить приблизительно синусоидальное пространственное распределение индукции, и ориентированы на режим синусоидального питания. Однако в регулируемых приводах режим питания, как правило, является несинусоидальным, что приводит к дополнительным потерям и снижению полезной мощности привода. Возникает вопрос совместимости режима песинусоидального питания с характеристиками двигателя, обусловленными его конструктивным исполнением, и в первую очередь, с характеристикой пространственного распределения индукции.

Если пренебречь магнитными сопротивлениями ферромагнитных частей машины, то магнитное сопротивление не зависит от тока и мгновенное значение индукции изменяется пропорционально току. Закон изменения индукции одной фазы в общем случае выражается в виде

$$B = B_m f_1(t) f_2(\alpha), \qquad (1)$$

где $B_m$ — амплитуда магнитной индукции; $f_1(t)$ — временна́я периодическая функция, вид которой определяется законом изменения переменного тока в фазе; $f_2(\alpha)$ — пространственная периодическая функция распределения магнитной индукции в воздушном зазоре вдоль окружности статора, аргументом которой является угол $\alpha$, отсчитываемый в неподвижной системе координат.

Функция $B=B(t, \alpha)$ для возможности получения вращающего поля в многофазной системе должна представлять собой стоячую волну, раскладываемую на две, вращающиеся в противоположные стороны со скоростями $a$, т.е. удовлетворять однофазному одномерному волновому уравнению

$$\frac{\partial^2 B(t,\alpha)}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 B(t,\alpha)}{\partial \alpha^2}. \qquad (2)$$

Отсюда становится ясным, что функции $f_1(t)$ и $f_2(t)$ должны быть определенным образом согласованы. Проинтегрировав уравнение (2) один раз по времени, а другой — по углу, получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} &= a^2 \int \frac{\partial^2 B}{\partial \alpha^2} dt; \\ \frac{\partial B}{\partial \alpha} &= \frac{1}{a^2} \int \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} d\alpha. \end{aligned} \qquad (3)$$

Функции $f_1(t)$ и $f_2(\alpha)$ для удовлетворения условиям (2) и (3) должны обладать следующими свойствами:

$$\frac{f_2(\alpha)}{f_1(t)} = a^2 \frac{\dfrac{d^2 f_2(\alpha)}{d\alpha^2}}{\dfrac{d^2 f_1(t)}{dt^2}}; \qquad (4)$$

$$\frac{\dfrac{df_2(\alpha)}{d\alpha}}{\dfrac{df_1(t)}{dt}} = \frac{1}{a^2} \frac{\int f_2(\alpha)\, d\alpha}{\int f_1(t)\, dt}. \qquad (5)$$

Указанными свойствами могут обладать только подобные функции $f_1(t)$ и $f_2(\alpha)$. Это подтверждает и известное частное решение уравнения (2):

$$B_\nu(t,\alpha) = A_\nu \cos(\nu a t - \varphi_{\nu t}) \cos(\nu\alpha - \varphi_{\nu\alpha}). \qquad (6)$$

Именно частное решение (6) является теоретическим обоснованием необходимости синусоидального распределения индукции в зазоре вдоль окружности статора при синусоидальном токе в фазе.

**Постановка и решение задачи.** Для опреде-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ления критериев подобия пространственной и временно́й функций необходимо установить, при каких условиях решение (1) с определенными начальными и граничными условиями удовлетворяет уравнению (2). Здесь для корректности необходимо сделать определенные замечания, касающиеся как постановки задачи, так и основных допущений при ее решении.

Так как рассматривается совместимость преобразователя и двигателя в плане образования вращающегося поля статора, то допустимо ограничиться режимом холостого хода асинхронного двигателя, приняв МДС двигателя равной МДС статора. Второстепенным фактором в условиях задачи является зубцово-пазовая структура статора и ротора при высокой степени дискретности на полюсном делении. Последнее позволяет рассматривать поле в зазоре между гладкими статором и ротором. Полагая магнитную проницаемость ротора и статора бесконечно большой, считаем, что напряженность поля отлична от нуля только в зазоре.

Для воздушного зазора уравнение Даламбера векторного магнитного потенциала и уравнение индукции представляют собой трехмерные волновые уравнения:

$$v^2 \nabla^2 \vec{A} = \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2}; \quad v^2 \nabla^2 \vec{B} = \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}. \qquad (7)$$

Рассматривая поле двигателя как плоскопараллельное, т. е. исключая торцевую зону, имеем $\vec{A}=A(r,\alpha)\vec{e_z}$, и векторное уравнение (7) приобретает вид скалярного двухмерного уравнения:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial A}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 A}{\partial \alpha^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2}. \qquad (8)$$

После введения дополнительной функции $U=Ar$ уравнение (8) приводится к виду

$$f(r) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 U}{\partial \alpha^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \qquad (9)$$

где $f(r)=\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} - \frac{\partial A}{\partial r}$.

Учитывая, что $B_\alpha=-\partial A/\partial r$, условие $f(r)=0$ обеспечивается при $B_\alpha=C/r$, где $C=\text{const}$, что соответствует физической сути увеличения индукции при уменьшении радиуса. При этом условии двухмерное уравнение для $A$ приводится к одномерному уравнению для функции $U$:

$$a^2 \frac{\partial^2 (rA)}{\partial \alpha^2} = \frac{\partial^2 (rA)}{\partial t^2}, \qquad (10)$$

где $a^2=v^2/r^2$, и позволяет говорить об одномерности волнового процесса на вполне определенном радиусе, например на поверхности статора. Это справедливо по отношению к радиальной составляющей индукции ($r^2 B_r=\partial U/\partial \alpha$). В дальнейшем под термином «индукция» понимается ее радиальная составляющая на поверхности статора. При решении задачи определения критериев подобия уравнение (2) следует привести к безразмерному виду. Введем обозначения:

$$\tilde{B} = \frac{B}{B_m}, \quad \tilde{t} = \frac{at}{2\pi}, \quad \tilde{\alpha} = \frac{\alpha}{2\pi}. \qquad (11)$$

Уравнение (2) приобретает вид

$$\frac{\partial^2 \tilde{B}}{\partial \tilde{t}^2} = \frac{\partial^2 \tilde{B}}{\partial \tilde{\alpha}^2}. \qquad (12)$$

Рассматривая пространственно-временну́ю систему, состоящую из источника периодического тока и обмотки двигателя с пространственно распределенной по периодическому закону индукцией, необходимо отметить следующее. Система является изолированной, т. е. энергия не может ни выходить из системы, ни входить в нее через ее границы. Значит, граница системы не совершает работы и работа над ней не может быть совершена. Работа определяется как произведение обобщенной силы на обобщенную координату. В случае жестко закрепленной границы ($0 \leqslant \tilde{\alpha} \leqslant 1$) изменение обобщенной координаты на границе отсутствует, следовательно, работа (энергия) на границе равна нулю. Последнее требует равенства нулю магнитной индукции на границе

$$\tilde{B}(0, \tilde{t}) = \tilde{B}(1, \tilde{t}) = 0. \qquad (13)$$

В случае свободной границы ($-\infty < \alpha < \infty$) должна быть равна нулю обобщенная сила, определяемая производной от энергии по обобщенной координате, поэтому на границе должна быть равна нулю производная индукции по обобщенной координате

$$\frac{\partial \tilde{B}}{\partial \tilde{\alpha}}(0, \tilde{t}) = \frac{\partial \tilde{B}}{\partial \tilde{\alpha}}(1, \tilde{t}) = 0. \qquad (14)$$

Общие решения данных задач широко известны из научной литературы[1]. В случае первой задачи (12), (13) при любых начальных условиях решением является

$$\tilde{B}_1(\tilde{\alpha}, \tilde{t}) = \sum_\nu A_{\nu 1} \sin \nu \tilde{\alpha} \cos(\nu \tilde{t} - \tilde{\varphi}_{\nu \tilde{t}}), \qquad (15)$$

где

$$A_{\nu 1} \cos \tilde{\varphi}_{\nu \tilde{t}} = \frac{1}{2}\int_0^1 \tilde{B}_1(\tilde{\alpha}, 0) \sin \nu \tilde{\alpha}\, d\tilde{\alpha};$$

$$A_{\nu 1} \sin \tilde{\varphi}_{\nu \tilde{t}} = -\frac{1}{2\nu}\int_0^1 \frac{\partial \tilde{B}_1}{\partial \tilde{t}}(\tilde{\alpha}, 0) \sin \nu \tilde{\alpha}\, d\tilde{\alpha}.$$

В случае второй задачи (12), (14) при любых начальных условиях

[1] **Арсенин В.Я.** Методы математической физики и специальные функции, издательство «Наука», главная редакция физико-математической литературы, Москва, 1974, 432 с.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$\tilde{B}_2(\tilde{\alpha},\tilde{t}) = \sum_{\nu} A_{\nu 2}\cos\nu\tilde{\alpha}\cos(\nu\tilde{t}-\tilde{\varphi}_{\nu\tilde{t}}), \quad (16)$$

где

$$A_{\nu 2}\cos\tilde{\varphi}_{\nu\tilde{t}} = \frac{1}{2}\int_0^1 \tilde{B}_2(\tilde{\alpha},0)\cos\nu\tilde{\alpha}\,d\tilde{\alpha};$$

$$A_{\nu 2}\sin\tilde{\varphi}_{\nu\tilde{t}} = -\frac{1}{2\nu}\int_0^1 \frac{\partial\tilde{B}_2}{\partial\tilde{t}}(\tilde{\alpha},0)\cos\nu\tilde{\alpha}\,d\tilde{\alpha}.$$

В реальной системе «обмотка двигателя — источник» вследствие электромагнитной инерции начальное значение тока, а следовательно и индукции, всегда равно нулю [$\tilde{B}(\tilde{\alpha},0)=0$], и значит в решениях задач $\tilde{\varphi}_{\nu\tilde{t}} = 1/4$. Таким образом, решение первой задачи имеет вид

$$\tilde{B}_1(\tilde{\alpha},\tilde{t}) = \sum_{\nu} A_{\nu 1}\sin\nu\tilde{\alpha}\sin\nu\tilde{t}, \quad (17)$$

а второй

$$\tilde{B}_2(\tilde{\alpha},\tilde{t}) = \sum_{\nu} A_{\nu 2}\cos\nu\tilde{\alpha}\sin\nu\tilde{t}. \quad (18)$$

Решения (17) и (18) волнового уравнения (12) прежде всего указывают на идентичность частотных спектров пространственных и временны́х процессов. Это объясняется тем, что в силу ортогональности собственных функций для других частот, не равных собственным, однородное уравнение (12) не имеет других решений, кроме тривиального (нулевого).

Однако форма данных решений не соответствует сути рассматриваемой задачи, так как решение уравнения (12) следует искать в виде

$$\tilde{B}(\tilde{\alpha},\tilde{t}) = f_1(\tilde{t})f_2(\tilde{\alpha}). \quad (19)$$

Отмеченная выше идентичность частот временны́х и пространственных спектров, а также вид решений (17) и (18) обуславливает поиск решения для задачи (12), (13) в виде

$$\tilde{B}_1(\tilde{\alpha},\tilde{t}) = \left(\sum_{\nu} A_{\tilde{\alpha}\nu 1}\sin\nu\tilde{\alpha}\right)\left(\sum_{\nu} A_{\tilde{t}\nu 1}\sin\nu\tilde{t}\right), \quad (20)$$

а для задачи (12), (14)

$$\tilde{B}_2(\tilde{\alpha},\tilde{t}) = \left(\sum_{\nu} A_{\tilde{\alpha}\nu 2}\cos\nu\tilde{\alpha}\right)\left(\sum_{\nu} A_{\tilde{t}\nu 2}\sin\nu\tilde{t}\right). \quad (21)$$

Прямой подстановкой решений (20) и (21) в уравнение (12)*, а также (20) в (13), а (21) в (14) убеждаемся в том, что указанные решения удовлетворяют уравнению и граничным условиям, а также начальному условию $\tilde{B}(\tilde{\alpha},0)=0$ при $A_{\tilde{\alpha}\nu 1}=A_{\tilde{t}\nu 1}=A'_{\nu 1}$ и $A_{\tilde{\alpha}\nu 2}=A_{\tilde{t}\nu 2}=A'_{\nu 2}$, т. е. при идентичности пространственного и временно́го амплитудных спектров. В результате искомые решения приобретают вид

$$\tilde{B}_1(\tilde{\alpha},\tilde{t}) = \left(\sum_{\nu} A'_{\nu 1}\sin\nu\tilde{\alpha}\right)\left(\sum_{\nu} A'_{\nu 1}\sin\nu\tilde{t}\right) =$$

$$= \sum_{\nu}(A'_{\nu 1})^2\sin\nu\tilde{\alpha}\sin\nu\tilde{t} + \sum_{1\neq s} A'_{q1}\sin q\tilde{\alpha}A'_{s1}\sin s\tilde{t}; \quad (22)$$

$$\tilde{B}_2(\tilde{\alpha},\tilde{t}) = \left(\sum_{\nu} A'_{\nu 2}\cos\nu\tilde{\alpha}\right)\left(\sum_{\nu} A'_{\nu 2}\sin\nu\tilde{t}\right) =$$

$$= \sum_{\nu}(A'_{\nu 2})^2\cos\nu\tilde{\alpha}\sin\nu\tilde{t} + \sum_{1\neq s} A'_{q2}\cos q\tilde{\alpha}A'_{s1}\sin s\tilde{t}. \quad (23)$$

Первые составляющие в этих уравнениях представляют собой нетривиальные решения, в то время как вторые являются тривиальными (нулевыми) решениями вследствие ортогональности собственных функций. На основании теоремы единственности, сопоставляя (17) и (22), а также (18) и (23), устанавливаем соотношения

$$A'_{\nu 1} = \sqrt{A_{\nu 1}}; \quad A'_{\nu 2} = \sqrt{A_{\nu 2}}. \quad (24)$$

Рассмотрим образование вращающего магнитного поля в двухфазной системе обмоток в условиях первой задачи нетривиальными решениями. Индукция первой обмотки

$$\tilde{B}_1^{(1)}(\tilde{\alpha},\tilde{t}) = \sum_{\nu}(A'_{\nu 1})^2\sin\nu\tilde{t}\sin\nu\tilde{\alpha}. \quad (25)$$

Ось второй обмотки смещаем на угол $\tilde{\beta}$, а ток (индукцию) во времени на момент $\tilde{\tau}$, тогда

$$\tilde{B}_1^{(2)}(\tilde{\alpha},\tilde{t}) = \sum_{\nu}(A'_{\nu 2})^2\sin\nu(\tilde{t}+\tilde{\tau})\sin\nu(\tilde{\alpha}+\tilde{\beta}). \quad (26)$$

Суммарная индукция нетривиальных решений:

$$\tilde{B}_1 = \tilde{B}_1^{(1)} + \tilde{B}_1^{(2)} = \frac{1}{2}\sum_{\nu}(A'_{\nu 1})^2[\cos\nu(\tilde{t}-\tilde{\alpha}) - \cos\nu(\tilde{t}+\tilde{\tau}) + \cos(\tilde{t}+\tilde{\tau}-\tilde{\alpha}-\tilde{\beta}) - \cos(\tilde{t}+\tilde{\tau}+\tilde{\alpha}+\tilde{\beta})]. \quad (27)$$

Для компенсации обратных волн и сложения прямых необходимо выполнение условий:

$$\tilde{\tau}+\tilde{\beta} = \frac{1}{2}; \quad \tilde{\tau}-\tilde{\beta} = 0, \quad \text{т.е.} \quad \tilde{\tau} = \tilde{\beta} = \frac{1}{4}. \quad (28)$$

При этом суммарная индукция нетривиальных решений, т. е. вращающегося поля,

$$\tilde{B}_1 = \sum_{\nu}(A'_{\nu 1})^2\cos\nu(\tilde{t}-\tilde{\alpha}). \quad (29)$$

Выражение (29) показывает, что в создании вращающегося поля при одинаковых временны́х и пространственных амплитудно-частотных спектрах

* Ввиду абсолютной сходимости рядов здесь целесообразно после взятия производных воспользоваться формулой умножения Коши для рядов

$$\left[\left(\sum_{n=1}^{\infty} a_n\right)\left(\sum_{n=1}^{\infty} b_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty}\left(\sum_{m=1}^{n} a_m b_{n-m+1}\right)\right].$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

принимают участие все гармоники, суммируясь арифметически. Зафиксировав фазу колебаний и определив фазовую скорость:

$$\nu(\tilde{t}-\tilde{\alpha})=\text{const};\ \nu-\nu\frac{d\tilde{\alpha}}{d\tilde{t}}=0;\ v_{\text{ф}}=\frac{d\tilde{\alpha}}{d\tilde{t}}=1, \quad (30)$$

убеждаемся в том, что фазовая скорость одинакова для всех гармоник. Результирующая индукция с учетом тривиальных решений

$$\tilde{B}_{1\text{рез}}=\left(\sum_{\nu}A'_{\nu1}\sin\nu\tilde{\alpha}\right)\left(\sum_{\nu}A'_{\nu1}\sin\nu\tilde{t}\right)+$$
$$+\left[\sum_{\nu}A'_{\nu1}\sin\nu\left(\tilde{\alpha}+\frac{1}{4}\right)\right]\times\left[\sum_{\nu}A'_{\nu1}\sin\nu\left(\tilde{t}+\frac{1}{4}\right)\right]. \quad (31)$$

**Коэффициент совместимости преобразователя и двигателя.** Определим указанный коэффициент совместимости как отношение средней объемной плотности энергии вращающегося магнитного поля за период изменения тока к средней объемной плотности энергии результирующего поля статора, обусловленной несинусоидальной формой тока преобразователя и формой пространственного распределения индукции двигателя. Разумеется, при синусоидальном токе преобразователя и синусоидальном распределении индукции в двигателе по поверхности статора указанные плотности энергии равны и коэффициент совместимости равен единице. Определение этого коэффициента наиболее просто можно осуществить в системе координат, вращающейся с фазовой скоростью ($\tilde{\alpha}=\tilde{t}$). Учитывая, что объемная плотность энергии магнитного поля $W_0=\frac{B^2}{\mu_a}$, и полагая $\mu_a=\text{const}$, получаем:

$$K=\left(\int_0^1\tilde{B}_1^2\,d\tilde{t}\right)\Big/\left(\int_0^1\tilde{B}_{1\text{рез}}^2\,d\tilde{t}\right). \quad (32)$$

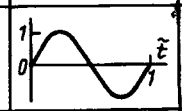
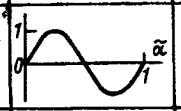
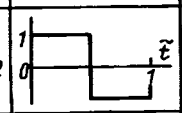
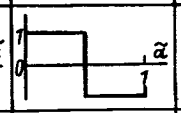
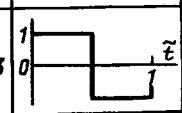
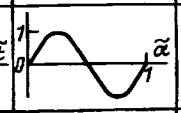
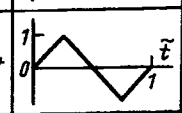
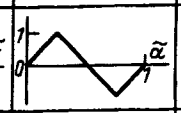
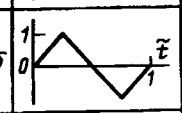
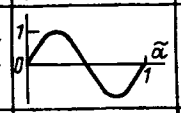
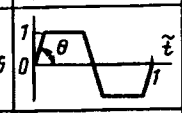
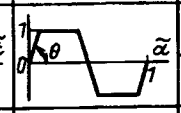
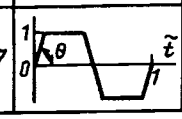
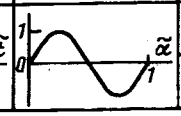
Учитывая, что функции пространственного и временно́го распределения индукции являются симметричными и раскладываются в ряды Фурье, содержащие нечетные гармоники в соответствии с (29) и (31) при $\tilde{\alpha}=\tilde{t}$, имеем

$$K=\left\{1+0{,}5\left[\sum_{q\neq s}(A'_{q1}A'_{s1})^2\right]\Big/\left[\sum_{\nu}(A'_{\nu1})^2\right]^2\right\}^{-1}. \quad (33)$$

В случае синусоидального пространственного распределения индукции и несинусоидального тока, представленного рядом Фурье, коэффициент совместимости определяется в виде

$$K'=\left[1+0{,}5\left(\sum_{\nu=3,5,\ldots}A^2_{\tilde{t}\nu1}\right)\Big/A^2_{\tilde{t}11}\right]^{-1}. \quad (34)$$

Однако указанные коэффициенты не позволяют полностью решить вопрос совместимости, так как усреднение плотности энергии проведено только во временно́й области. Полная картина совместимости представляется только после указания достигнутой относительной индукции вращающегося поля.

| № п.п | Форма тока | Форма индукции | Индукция вращающегося поля | Коэффициент совместимости |
|---|---|---|---|---|
| 1 |  |  | 1 | 1 |
| 2 |  |  | 1,85 | 0,9 |
| 3 |  |  | 1,27 | 0,93 |
| 4 |  |  | 0,67 | 0,98 |
| 5 |  |  | 0,81 | 0,93 |
| 6 |  |  | θ=30°<br>1,59<br>θ=60°<br>1,11 | <br>0,95<br><br>0,98 |
| 7 |  |  | θ=30°<br>1,22<br>θ=60°<br>1,05 | <br>0,88<br><br>0,99 |

В таблице приведены результаты расчетов коэффициентов совместимости и относительной индукции вращающегося поля при различных формах пространственного и временно́го распределения индукции. Все расчеты проведены при ограничении тремя первыми гармониками разложения функций в ряд Фурье.

Рассмотрим решение вопроса совместимости на конкретном примере. В случаях 2 и 3 таблицы формы токов идентичны, т. е. от преобразователя потребляется одинаковая энергия. Коэффициент совместимости в 1,03 раза выше при синусоидальной форме индукции по сравнению с прямоугольной. Однако интенсивность вращающегося поля в случае прямоугольной формы индукции в 1,45 раза выше по сравнению с синусоидальной. С теоретических позиций этот факт объясняется в комментарии к формуле (29). При сравнении предпочтение должно быть отдано случаю 2 таблицы. С рассматриваемых позиций из всех случаев, приведенных в таблице, наиболее рациональной формой пространственной и временно́й функций представляется равнобедренная трапеция.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

**Выводы.** 1. При одинаковых относительных амплитудно-частотных спектрах временнóго и пространственного распределения индукции фазовая скорость одинакова для всех гармоник, и в создании вращающегося поля принимают участие все гармоники, причем амплитуды их суммируются арифметически.

2. По совокупности показателей в виде коэффициента совместимости и относительной индукции вращающегося поля предпочтительным является режим несинусоидального питания, обеспечивающий совпадение относительного амплитудно-частотного спектра тока со спектром пространственного распределения относительной индукции.

3. Наиболее удачной совокупностью указанных показателей обладает случай пространственного и временнóго распределения индукции по периодическому закону равнобедренной трапеции.

4. При проектировании приводов с полупроводниковыми преобразователями двигатель и преобразователь должны рассматриваться как единый комплекс, в котором режим несинусоидального питания должен быть согласован с характеристикой распределения индукции в зазоре двигателя.

*[25.12.95]*

*Авторы:* ***Малинин Леонид Иванович*** *окончил электромеханический факультет (ЭМФ) Новосибирского электротехнического института (НЭТИ) в 1967 г. В 1993 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Энергетика сервоприводов постоянного тока» в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ). Профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» НГТУ.*

***Малинин Валерий Иванович*** *окончил ЭМФ НЭТИ в 1968 г. В 1979 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование звена «импульсный преобразователь постоянного тока — двигатель комбинированного возбуждения» электропривода промышленных роботов» в НЭТИ. Старший научный сотрудник кафедры «Электромеханика» НГТУ.*

***Макельский Валерий Дмитриевич*** *окончил ЭМФ НЭТИ в 1963 г. В 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование максимальной напряженности поля в высоковольтных конструкциях с кромками» в Томском политехническом институте. Доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» НГТУ.*

***Тюков Валентин Андреевич*** *окончил ЭМФ НЭТИ в 1965 г. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование тепловых процессов в асинхронных двигателях с беспазовым статором в установившемся режиме» в НЭТИ. Заведующий кафедрой «Электромеханика», декан факультета автоматизированных электромеханических систем НГТУ.*

**К ЧИТАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «Электричество»**

В настоящее время появилась возможность бесплатно получать оглавления нашего журнала через электронные сети. Эту услугу оказывает служба ИНФОМАГ, организованная в Московском физико-техническом институте. Кроме оглавлений журнала «Электричество» служба ИНФОМАГ распространяет оглавления более 80 отечественных и зарубежных научно-технических журналов, а также ряд научных электронных бюллетеней. Все материалы службы ИНФОМАГ доступны в режиме ON-LINE через сервер РосНИИРОС по следующим URL:

http://www.ripn.net

gopher://gopher. ripn.net

Для получения материалов службы ИНФОМАГ по подписке через электронную почту следует направить письмо с командой

HELP по адресу ims@ripn. net

Полная информация о службе ИНФОМАГ может быть получена в ответ на команду HELP, направленную по адресу infomag@lgrant.mipt.msk.su

С искренним уважением

В.Г. Веселаго

Руководитель службы ИНФОМАГ

infomag@lgrant.mipt.msk.su

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# Взрывобезопасность объектов газовой промышленности с электротехническими устройствами

БЕЛОУСЕНКО И.В.

*Предлагается математическая модель оценки вероятности появления взрыва во взрывопожароопасных помещениях при эксплуатации в нем технологического оборудования, электрооборудования и средств защиты. Модель отличается от известных моделей тем, что учитывается средний интервал времени между появлением следующих событий: возникновение взрывоопасной среды, нарушения систем газовой защиты, отказы в системах вентиляции, появление опасного источника и средний интервал времени проверок мест, опасных в отношении выброса горючих газов из технологических установок, систем газовой защиты и систем аварийного проветривания. Приведен пример расчета.*

Ключевые слова: *электротехнические устройства, токовая защита, взрывобезопасность, математическая модель*

*The paper presents mathematical model of valuation's probability of explosion on technical rooms during exploitation of electrical equipment, means of protection. Model differs from another ones by discounting the middle time of apprarance of such events. The events are: appearance of explosion surroundings, rejection in the systems of gas protection and technological ventilation, appearance of explosion's source. The middle time are looked in connection with maintenance time of technolodical equipment. The examples of calculation are proposed.*

Key words: *electrical equipment, currents-protection, explosion-proof, mathematical model*

Основная задача обеспечения безопасности технологического объекта в период эксплуатации состоит в почти полном исключении взрывов (пожаров) за счет надежной работы средств технологической защиты, устройств релейной защиты и автоматики как составной части комплекса технологической защиты объекта и четкой работы персонала, обслуживающего оборудование и средства защиты [1].

Согласно [2] производственные процессы должны разрабатываться так, чтобы вероятность возникновения взрыва на любом взрывоопасном участке в течение года не превышала $10^{-6}$, т. е. на одном из миллионов эксплуатирующихся взрывоопасных участков вследствие случайных нарушений возможен, в среднем, один взрыв в год.

Источниками случайных взрывов на технологическом объекте с электротехническими устройствами являются следующие три системы: электрооборудование — как носитель источника инициирования взрыва (короткое замыкание — КЗ; замыкание на землю — ОЗ); источник выброса в системы защиты (как технологические, так и электротехнические), которые препятствуют длительному существованию опасного источника либо взрывоопасной среды.

Источники выброса (места в технологической установке, из которых могут выделяться в окружающую атмосферу газ, пар, туман или жидкость, образующие с воздухом помещения газообразную взрывоопасную среду) подразделяются на три класса [3].

Источник выброса непрерывного действия, представляющий собой источник, который непрерывно выделяет в атмосферу помещения взрывоопасный продукт, например, открытая емкость с легковоспламеняющейся жидкостью (ЛВЖ).

Источник выброса первого класса — это источник, из которого периодически либо в случайное время при нормальной работе, происходит выброс газа, например, уплотнение насоса дает течь при нормальной работе.

Источник выброса второго класса — это такой источник, который не дает выбросов газов при нормальной работе, но проявляется в аварийных случаях, например, уплотнение насоса, дающего течь при неисправностях фланцевых соединений или клапана превышения давления.

Для контроля за накоплением горючих газов и паров в воздухе производственных помещений используют приборы газового анализа — газоанализаторы, газосигнализаторы, индикаторы и стационарные автоматические сигнализаторы.

Стационарные автоматические сигнализаторы предназначены для непрерывного контроля воздушной среды производственных помещений и предотвращения аварий, связанных с загазованностью взрывоопасными веществами. Сигналы от датчиков газа подаются к исполнительным механизмам, а именно электрозадвижкам и пневмоотсекателям.

Одним из способов предупреждения образования взрывоопасной среды является флегматизация. Различают два метода флегматизации, основанных на разбавлении воздуха инертными разбавителями (азотом, диоксидом углерода) и на введении в воздух ингибиторов горения — хла-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

донов и комбинированных газовых составов на их основе.

Первый метод предназначен для взрывозащиты технологического оборудования, а второй преимущественно для производственных помещений.

Одним из распространенных способов снижения взрывопожароопасности производственных помещений является аварийная вентиляция, которая включается автоматически при превышении предельно допустимой взрывобезопасной концентрации газа в цикле. Электроснабжение аварийной вентиляции осуществляется по первой категории надежности. Основные требования к аварийной вентиляции изложены в [4].

Систему аварийной вентиляции следует предусматривать в производственных помещениях, где возможно внезапное поступление в воздух большого количества вредных или взрывоопасных газов или паров (либо при авариях на технологической установке) в соответствии с требованиями технологической части проекта и ведомственных нормативных документов. Аварийная вентиляция вместе с основной должна обеспечивать не менее восьми воздухообменов в час по полному внутреннему объему помещения, если в технологической части проекта отсутствует расчет производительности или указания о необходимом воздухообмене аварийной вентиляции. При этом в помещениях насосных и компрессорных станций (вредных или горючих газов) категорий А и В вентиляция должна обеспечивать восьмикратный аварийный воздухообмен в дополнение к воздухообмену, создаваемому системами основной вентиляции.

Основная вентиляция при нормальном протекании технологического процесса должна обеспечивать концентрацию поступающих в помещение горючих газов и паров в пределе 5% нижнего концентрационного предела распространения пламени. Количество воздуха, перемещаемого по воздуховодам систем местных отсосов, удаляющих взрывоопасные газы и пары, следует рассчитывать по нормам технологического проектирования так, чтобы при нормальной работе технологического оборудования и при его аварии концентрация паровоздушных смесей в воздуховодах не превышала предельно допустимых взрывоопасных концентраций, определяемых ГОСТ 12.1.044—84.

Неравномерность действия вентиляции по всему объему помещения, а также неправильное расположение газоанализаторов может привести к образованию застойных неконтролируемых зон, которые должны рассматриваться как зоны класса В-1. Кроме того, практикуемое использование блок-контакта магнитного пускателя как сигнализатора остановки вентагрегата и подачи команды на включение резервного не может считаться достаточно надежным, так как не указывает на такие неисправности, как соскальзывание ремня вентилятора, срыв крыльчатки с оси или реверса электродвигателя.

Для осуществления нормальной работы вентагрегата следует применять датчики, реагирующие либо на изменение давления или скорости подачи свежего воздуха в помещениях, либо на изменение этих показателей вместе; это также относится и к вентсистемам, создающим избыточное давление в электропомещениях (распределительные устройства, подстанции, щитовые, КИП).

Максимальная токовая защита либо защита от замыкания фазы на землю сокращает существование опасного источника (КЗ, ОЗ) до среднего времени ее срабатывания.

Для предотвращения появления источников воспламенения на взрывоопасных объектах применяются специальные виды электрооборудования, условия безопасного применения которого регламентируются [5]. Во взрывоопасных помещениях используется специальное взрывозащитное электрооборудование, которое подразделяется по уровням и видам взрывозащиты, категориям, группам и температурным классам. Категории взрывоопасных смесей газов и паров с воздухом устанавливают в зависимости от размера безопасного экспериментального максимального зазора оболочки (БЭМЗ), через который не происходит передача взрыва из оболочки в окружающую среду.

Основной мерой защиты от взрыва является исключение возможного совпадения в пространстве и времени взрывоопасной среды с источником инициирования взрыва.

Во взрывоопасных помещениях взрыв возможен при совпадении в пространстве и времени следующих событий: появление взрывоопасной газовоздушной смеси в помещении; отказ в срабатывании системы газовой защиты; отказ в системе аварийной вентиляции помещений; появление опасного электрического источника.

Обозначим через $z_R(t)$ процесс изменения состояния элемента $k$ ($k=1, 2, 3, 4$). Предположим, что $k$ принимает два значения: 0 или 1, если элемент $k$ находится соответственно в безопасном или опасном состоянии [1].

Что касается статистической природы этих функций, предположим следующее:

вероятность переходов из безопасного состояния в опасное за промежуток времени $\Delta t$ равна $\lambda_R \Delta t + 0(\Delta t)$, где $0(\Delta t)$ означает, что вероятность появления более одного опасного состояния в интервале $t+\Delta t$ является величиной высшего порядка по сравнению с $\Delta t$;

вероятность переходов из опасного состояния

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

в безопасное за время $\Delta t$ равно $\mu_K \Delta t + 0(\Delta t)$ и не зависит от предшествующего течения процесса $\mathfrak{z}_R(t)$.

Величины $\lambda_k$ и $\mu_k$ являются параметрами рассматриваемого процесса, при этом $\lambda_k$ характеризует интенсивность или скорость, с которой безопасные промежутки времени сменяются опасными, а $\mu_k$ — частоту или скорость смены опасных промежутков времени на безопасные. Принятые допущения означают, что $\mathfrak{z}_k(t)$ можно рассматривать как процесс Маркова с двумя состояниями: 0 (безопасное) и 1 (опасное).

Взрыв в системе наступает в момент встречи процессов $\mathfrak{z}_R(t)$ в состоянии 1, т. е. когда $\mathfrak{z}_1(t)=1$; $\mathfrak{z}_2(t)=1$; $\mathfrak{z}_3(t)=1$; $\mathfrak{z}_4(t)=1$ (рис. 1).

Выразим значение среднего времени до взрыва в помещении через параметры процессов $\mathfrak{z}_1(t)$, $\mathfrak{z}_2(t)$, $\mathfrak{z}_3(t)$, $\mathfrak{z}_4(t)$.

Для этого совокупность указанных процессов рассмотрим как процесс Маркова с шестнадцатью состояниями и непрерывным временем. Поведение во времени такой системы полностью описывается матрицей переходов $\mathbf{P}_4$:

$$\mathbf{P}_4 = \begin{bmatrix}
\alpha_1 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\mu_1 & \alpha_2 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & \lambda_2 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\mu_2 & 0 & \alpha_3 & 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_1 & 0 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\mu_3 & 0 & 0 & \alpha_4 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \mu_3 & 0 & \mu_1 & \alpha_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & \lambda_2 & 0 \\
0 & 0 & \mu_3 & \mu_2 & 0 & \alpha_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_4 & 0 & \lambda_1 & 0 \\
0 & \mu_2 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & \alpha_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_4 & \lambda_3 & 0 \\
\mu_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_8 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \mu_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_1 & \alpha_9 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \mu_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_2 & 0 & \alpha_{10} & 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \mu_4 & 0 & 0 & 0 & \mu_3 & 0 & 0 & \alpha_{11} & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \mu_4 & 0 & 0 & 0 & \mu_3 & 0 & \mu_1 & \alpha_{12} & 0 & 0 & 0 & \lambda_2 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_4 & 0 & 0 & 0 & \mu_3 & \mu_2 & 0 & \alpha_{13} & 0 & 0 & \lambda_1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_4 & 0 & \mu_2 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{14} & 0 & \lambda_3 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \mu_2 & \mu_1 & \mu_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{15} & \lambda_4 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}$$

Граф вероятностей возможных переходов для такой системы изображен на рис. 2.

В матрице (1)

$$\lambda_k = \frac{1}{d_k}; \quad \mu_k = \frac{1}{d_k}; \quad k = \overline{1,4};$$

$\bar{d}_1$, $d_1$ — средний интервал времени между появлениями источника инициирования взрывоопасной среды и длительность его существования; $\bar{d}_2$, $d_2$ — средний интервал времени между отказами системы газовой защиты и средняя длительность нахождения ее в отказавшем состоянии; $\bar{d}_3$, $d_3$ — средний интервал времени между отказами в аварийной системе проветривания цеха и средняя длительность нахождения ее в отказавшем состоянии; $\bar{d}_4$, $d_4$ — средний интервал

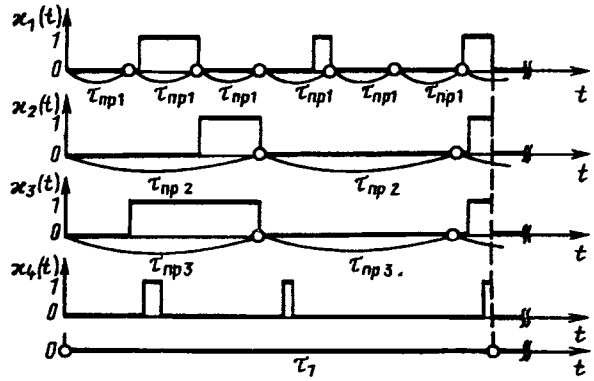



**Рис. 1.** Возможные реализации случайных процессов: $\mathfrak{z}_k(t)$ — процесс, описывающий изменение состояния элемента $k$ во времени, где $k=1$, источник выброса взрывоопасного продукта; $k=2$, система контроля загазованности; $k=3$, система аварийной вентиляции; $k=4$, электрооборудование (наличие или отсутствие в нем замыкания на землю)

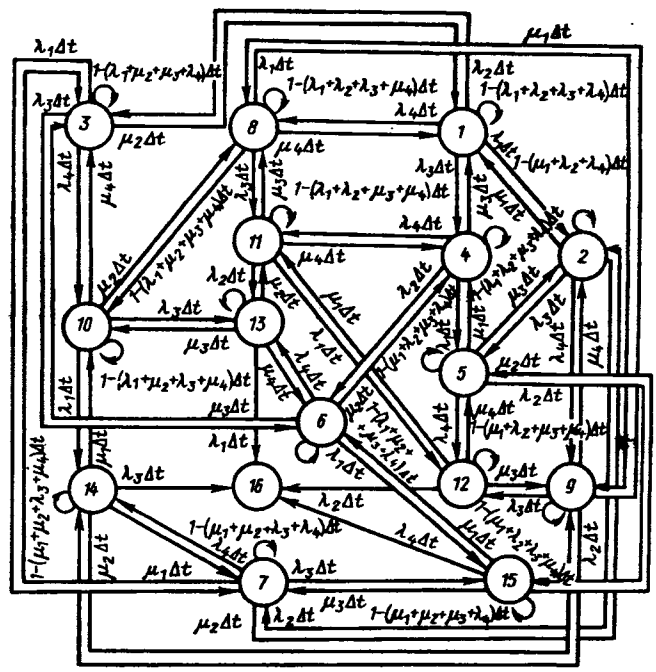


**Рис. 2.** Граф возможных переходов системы «взрывоопасная смесь — газовая защита — аварийная вентиляция — электрический источник»

времени между появлением опасного электрического источника и средняя длительность его существования; $\alpha_k = 1 - C_k$, где $C_k$ — сумма элементов соответствующей строки; $k = 1, 15$.

Если в начальный момент времени все элементы описанной системы находятся в безопасном состоянии, то среднее время до появления взрыва можно определить используя систему уравнений [6] и полученную матрицу (1):

$$\tau = (\mathbf{1} - \mathbf{Q})^{-1} \xi, \qquad (2)$$

где 1 — единичная матрица; $\mathbf{Q}$ — матрица, полученная из матрицы $P_4$ путем исключения поглощающего состояния; $\xi$ — вектор столбец, все элементы которого равны 1; $\tau = [\tau_i]_{i=1}^{15}$ — вектор-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

столбец; $\tau_i$ — средний интервал времени до взрыва, если в начальный момент времени система находилась в состоянии $i$.

Используя матрицу (1), систему уравнений (2) при выполнении условия

$$\bar{d}_1 \gg d_1;\quad \bar{d}_2 \gg d_2;\quad \bar{d}_3 \gg d_3;\quad \bar{d}_4 \gg d_4 \quad d_4 \ll d_1;\quad d_4 \ll d_2;\quad d_4 \ll d_3, \tag{3}$$

определяем время нахождения рассматриваемых систем в необнаруженном отказавшем состоянии при заданных сроках профилактики $\tau_{пр_1}$, $\tau_{пр_2}$, $\tau_{пр_3}$ следующим образом [7]:

$$d_i = \tau_{пр_i} - d_i\left[1 - \exp\left(\frac{-\tau_{пр_i}}{d_i}\right)\right]. \tag{4}$$

В тех случаях, когда $\tau_{пр_i}/\bar{d}_i<0{,}1$, $i=\overline{1,3}$, формула (4) примет вид

$$d_i = \tau_{пр_i}/2\bar{d}_i, \tag{5}$$

где $\tau_{пр_1}$ — интервал времени между проверками основных элементов технологического оборудования, которые могут явиться источниками выброса; $\tau_{пр_2}$ — интервал времени между проверками системы газовой защиты; $\tau_{пр_3}$ — интервал времени между проверками системы аварийной вентиляции.

Формула для определения приближенной оценки среднего времени до наступления взрыва во взрывоопасном помещении, если в начальный момент времени все рассматриваемые системы находились в безопасном состоянии, примет вид

$$\tau_1 = \frac{8\bar{d}_1^2\bar{d}_2^2\bar{d}_3^2\bar{d}_4^2}{\tau_{пр_1}^2\tau_{пр_2}^2\tau_{пр_3}^2}. \tag{6}$$

Используя теорему восстановления [8], определим интенсивность взрывов в рассматриваемом помещении:

$$H = \lim_{T\to\infty}\frac{H(T)}{T} = \frac{1}{\tau_1}. \tag{7}$$

Вероятность взрыва в течение времени $t$ можно определить, пользуясь формулой

$$F(t) = 1 - \exp(-Ht).$$

В тех случаях когда $Ht<0{,}1$; $F(t)\approx Ht$, при $t=1$ год $F(1)=H$.

**Пример.** Под наблюдением в предприятии «Ямбургтаздобыча» в течение 5 лет находилось семь цехов по подготовке газа (опасные в отношении взрыва).

За время наблюдения по плану [NMT] [9] за состоянием технологического оборудования, системой газовой защиты, системой аварийной вентиляции, системой электроснабжения были получены следующие данные:

$$\bar{d}_1=620\ ч;\quad \bar{d}_2=1800\ ч;\quad \bar{d}_3=4200\ ч;$$

$$\bar{d}_4=2200\ ч;\quad \bar{d}_4=6\cdot10^{-4}\ ч.$$

Места возможного появления утечек газа проверялись через $\tau_{пр_1}=6$ ч, система газовой защиты и аварийной вентиляции проверялась через $\tau_{пр_2}=\tau_{пр_3}=720$ ч.

Определяем интенсивность появления взрывов в год в цехе подготовки газа, используя приближенную формулу (7). Сравниваем значение $H$, полученное по приближенной формуле, с точным ее значением, определенным из решения на ЭВМ системы уравнений (2), используя матрицу (1) и формулы (4). Сравниваем точное значение $H_1$ с нормируемым в (2) значением [$H_0=10^{-6}$ год$^{-1}$].

Используя формулу (7), находим:

$$H = \frac{6^2\cdot720^2\cdot720^2}{8\cdot620^2\cdot1800^2\cdot4200^2\cdot2200} = 2{,}19\cdot10^{-7}\ год^{-1}.$$

Находим точное значение $H_1$; при решении системы уравнений (2) $\tau_1=5{,}06\cdot10^{10}$ ч, а $H_1=1/\tau_1=0{,}2\cdot10^{-10}\,4^{-1}=1{,}75\cdot10^{-7}$ год$^{-1}$.

При сравнении результата расчета по приближенной формуле с точным его значением видно, что приближенная формула для данной задачи занижает истинный уровень взрывобезопасности в 1,25 раза.

Сравнение полученной точной оценки $H=1{,}75\cdot10^{-7}$ год$^{-1}$ с нормируемой $H_0=10^{-6}$ год$^{-1}$ показывает, что взрывобезопасность обследованных технологических помещений выше нормируемого уровня в 5,71 раза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Ковалев А.П.** О проблемах оценки безопасности электростатических объектов. — Электричество, 1991, № 8.
2. **ГОСТ 12.1.010—76.** Взрывобезопасность. Общие требования.
3. **Пожарная** безопасность. Взрывобезопасность. Справ. изд. / А.Н. Баратов, Е.Н. Иванов, А.Я. Корольченко и др. — М.: Химия, 1987.
4. **Строительные** нормы и правила. СНиП 11-33-75.
5. **Правила** устройства электроустановок (ПУЭ). 6-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. **Кемени Дж., Спел Дж.** Конечные цепи Маркова. — М.: Наука, 1970.
7. **Белоусенко И.В.** О некоторых проблемах оценки взрывобезопасности объектов газовой промышленности. — Промышленная энергетика, 1995, № 6.
8. **Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.** Математические методы в теории надежности. — М.: Наука, 1965.
9. **ГОСТ 27.502—83.** Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений.


*[23.11.95]*

*Автор: **Белоусенко Игорь Владимирович** окончил энергетический факультет Донецкого политехнического института (ДПИ) в 1981 г. В 1991 г. в ДПИ защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Энергетические системы и управление ими». Главный технолог РАО «Газпром».*

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# Расчет электрического поля в тонких проводящих слоях

ВИШНЕВСКИЙ А.М., ЛАПОВОК А.Я.

*Рассматривается приближенный метод расчета потенциала электрического поля в тонких проводящих слоях, пластинах, связанный с разложением поля в ряд Тейлора по толщине слоя и снижением размерности исходного дифференциального уравнения. Приводятся результаты решения контрольной задачи, иллюстрирующие эффективность предложенного метода.*

Ключевые слова: *электрическое поле, тонкий проводящий слой, краевая задача, разложение Тейлора, расчет*

*An approximate method for calculating an electric field in thin conducting layers, plates and shells is considered. The method is based on using a Taylor expansion of the field with reducing an initial differential equation dimension. Results of solving a test problem, demonstrating an effectiveness of the method proposed are presented.*

Key words: *electric field, thin conducting layer, boundary value problem, Taylor expansion, calculation*

Во многих современных технических приложениях задача определения электрического поля в тонких проводящих слоях [1, 2]. Так, в реальных условиях атмосферной, морской и подземной коррозии процессы разрушения металла часто протекают в объемах, заполненных слоем электролита, толщина $h$ которого значительно меньше характерных линейных размеров электродов, образующих многоэлектродную гальваническую систему. Оценка скорости электрохимической коррозии металла $П$ обычно производится с использованием соотношения

$$П = П_э j_A ,$$

где $П_э$ — электрохимический эквивалент металла; $j_A$ — нормальная компонента плотности анодного тока на поверхности металла $S$.

Это приводит к необходимости расчета в рассматриваемых специфических условиях электрического потенциала $u$, поскольку плотность тока определяется равенством

$$\vec{j} = -\gamma \operatorname{grad} u ,$$

где $\gamma$ — удельная электрическая проводимость среды.

В рамках настоящей статьи поставленная задача решается в общей постановке, когда обе границы проводящего слоя могут являться электродами. При этом учитывается изменение по толщине слоя как потенциала, так и плотности тока.

Рассмотрим, введя криволинейную ортогональную систему координат $(x_1, x_2, x_3)$, задачу определения потенциала $u$ в тонком проводящем слое, ограниченном в соответствии с рис. 1 поверхностями $S_3^+$ и $S_3^-$.

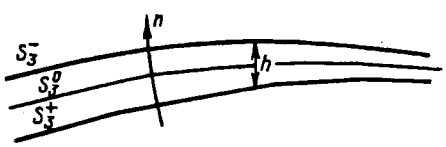



**Рис. 1.** Схема тонкого проводящего слоя

Расчет потенциала в отсутствие сторонних источников электрического поля сводится к интегрированию уравнения

$$\operatorname{div} \gamma \operatorname{grad} u = 0 ,$$

которое в развернутой форме можно переписать в виде

$$\frac{1}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} \left[ \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \gamma \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1} \frac{\partial u}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \gamma \frac{\lambda_1 \lambda_3}{\lambda_2} \frac{\partial u}{\partial x_2} \right) + \right.$$
$$\left. + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \gamma \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} \frac{\partial u}{\partial x_3} \right) \right] = 0 , \qquad (1)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — коэффициенты Ламе.

На верхней и нижней границах слоя в линейном приближении формулируются граничные условиях 3-го рода[1]

$$u^+ - k^+ \frac{\partial u^+}{\partial x_3} = \varphi^+ \text{ на } S^+ ; \qquad (2)$$

$$u^- + k^- \frac{\partial u^-}{\partial x_3} = \varphi^- \text{ на } S^- , \qquad (3)$$

где $k^+ = \frac{\rho^+ \gamma^+}{\lambda_3^+}$; $k^- = \frac{\rho^- \gamma^-}{\lambda_3^-}$; здесь $\rho^+$, $\rho^-$ — удельные переходные сопротивления металла; $\varphi^+$, $\varphi^-$ — эффективные потенциалы электродов; обычно на практике эти величины считаются кусочно-постоянными.

Нетрудно видеть, что приведенная формулировка охватывает и частный случай определения потенциала и тока под тонкой пленкой электролита [2] (при $\rho^- \to \infty$), когда граница $S^-$ является непроводящей.

Предлагаемый приближенный метод решения

[1] Здесь и далее верхний индексы «+», «–» и «0» указывают на то, что значение данной величины рассматривается на поверхности $S^+$, $S^-$ и $S^0$ соответственно.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

задачи реализует идею построения консервативных расчетных схем при определении полей в кусочно-однородных средах, включающих тонкие слои и оболочки [3, 4].

Выделим элемент проводящего слоя, ограниченный координатными поверхностями $x_3^+=\text{const}$, $x_3^-=\text{const}$, $x_m^+=\text{const}$, $x_m^+ + \Delta x_m = x_m^- = \text{const}$, $m=1,2$ (рис. 2).

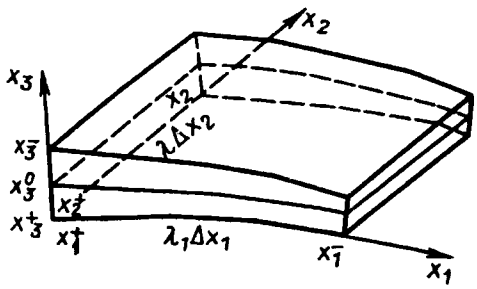



**Рис. 2.** Малый элемент слоя, используемый при выводе приближенного дифференциального уравнения

Рассмотрим уравнение баланса электрического тока для этого объема. Ток через боковую грань $x_1^+=\text{const}$ равен

$$\int\limits_{x_2^+}^{x_2^+ + \Delta x_2} \int\limits_{x_3^+}^{x_3^-} \gamma \frac{\partial u}{\partial x_1} \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1} dx_2\, dx_3 .$$

Для противоположной грани ($x_1^-=\text{const}$), отстоящей от первой на малое расстояние $\lambda_1 \Delta x_1$, с учетом изменения направления нормали значение тока равно

$$-\int\limits_{x_2^+}^{x_2^+ + \Delta x_2} \int\limits_{x_3^+}^{x_3^-} \gamma \frac{\partial u}{\partial x_1} \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1} dx_2\, dx_3 - \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \int\limits_{x_2^+}^{x_2^+ + \Delta x_2} \int\limits_{x_3^+}^{x_3^-} \gamma \frac{\partial u}{\partial x_1} \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1} dx_2\, dx_3 \right) \Delta x_1 .$$

Выполнив аналогичные операции для граней $x_2^+=\text{const}$ и $x_2^-=\text{const}$, получим

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left( \int\limits_{x_2^+}^{x_2^+ + \Delta x_2} \int\limits_{x_3^+}^{x_3^-} \gamma \frac{\partial u}{\partial x_1} \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_1} dx_2\, dx_3 \right) \Delta x_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \int\limits_{x_1^+}^{x_1^+ + \Delta x_1} \int\limits_{x_3^+}^{x_3^-} \gamma \frac{\partial u}{\partial x_2} \frac{\lambda_1 \lambda_3}{\lambda_2} dx_1\, dx_3 \right) \Delta x_2 +$$

$$+ \int\limits_{x_1^+}^{x_1^+ + \Delta x_1} \int\limits_{x_2^+}^{x_2^+ + \Delta x_2} \gamma^- \frac{\partial u^-}{\partial x_3} \frac{\lambda_1^- \lambda_2^-}{\lambda_3^-} dx_1\, dx_2 - \int\limits_{x_1^+}^{x_1^+ + \Delta x_1} \int\limits_{x_2^+}^{x_2^+ + \Delta x_2} \gamma^+ \frac{\partial u^+}{\partial x_3} \frac{\lambda_1^+ \lambda_2^+}{\lambda_3^+} dx_1\, dx_2 = 0 ,$$

откуда по теореме о среднем при $\Delta x_1 \to 0$, $\Delta x_2 \to 0$ получаем уравнение

$$\sum_{m=1}^{2} \frac{\partial}{\partial x_m} \int\limits_{x_3^+}^{x_3^-} \gamma \frac{\partial u}{\partial x_m} \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{n_m} \lambda_3\, dx_3 + \gamma^- \frac{\lambda_1^- \lambda_2^-}{\lambda_3^-} \frac{\partial u^-}{\partial x_3} - \gamma^+ \frac{\lambda_1^+ \lambda_2^+}{\lambda_3^+} \frac{\partial u^+}{\partial x_3} = 0 , \qquad (4)$$

где $n_m=(-1)^{m+1}$.

В пределах тонкого слоя, используя подход, предложенный в [5], разложим потенциал в ряд Тейлора по координате $x_3$ относительно точки $x_3^0$; ограничимся в разложении первыми тремя членами:

$$u(x_3) = \sum_{n=0}^{2} \frac{(x_3 - x_3^0)^n}{n!} \frac{\partial^n u(x_2^0)}{\partial x_3^n} + O(\tilde{h}^3) . \qquad (5)$$

Обозначим $\tilde{h}=x_3^- - x_3^+$. При этом $x_3^+ = x_3^0 - \frac{\tilde{h}}{2}$, $x_3^- = x_3^0 + \frac{\tilde{h}}{2}$; в свою очередь,

$$h = \int\limits_{x_3^+}^{x_3^-} \lambda_3\, dx_3 .$$

В дальнейшем используем приближенные равенства, следующие из (5):

$$u(x_3^0) = \frac{1}{2}(u^- + u^+) - \frac{\tilde{h}}{8} \left( \frac{\partial u^-}{\partial x_3} - \frac{\partial u^+}{\partial x_3} \right) + O(\tilde{h}^4) ; \qquad (6)$$

$$\frac{\partial u(x_3^0)}{\partial x_3} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u^-}{\partial x_3} + \frac{\partial u^+}{\partial x_3} \right) + O(\tilde{h}^2) ; \qquad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u(x_3^0)}{\partial x_3^2} &= \frac{1}{\tilde{h}} \left( \frac{\partial u^-}{\partial x_3} - \frac{\partial u^+}{\partial x_3} \right) + O(\tilde{h}^2) ; \\ u^- - u^+ &= \frac{\tilde{h}}{2} \left( \frac{\partial u^-}{\partial x_3} + \frac{\partial u^+}{\partial x_3} \right) + O(\tilde{h}^3) . \end{aligned} \right\} \qquad (8)$$

Используя в дополнение к последнему равенству граничные условия (2) и (3), можно исключить из (6)—(8) любые три из четырех неизвестных $\left( u^-, u^+, \frac{\partial u^+}{\partial x_3}, \frac{\partial u^+}{\partial x_3} \right)$. Решая задачу относительно $u^+$, имеем

$$\frac{\partial^n u(x_3^0)}{\partial x_3^n} = a_n u^+ + b_n \varphi^+ + c_n \varphi^- . \qquad (9)$$

Выражения для коэффициентов $a_n$, $b_n$ и $c_n$ сведены в табл. 1.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

*Таблица 1*

| $n$ | $a_n k^+\left(k^- + \frac{\tilde{h}}{2}\right)$ | $b_n k^+\left(k^- + \frac{\tilde{h}}{2}\right)$ | $c_n k^+\left(k^- + \frac{\tilde{h}}{2}\right)$ |
|---|---|---|---|
| 0 | $k^- k^+ + \frac{3\tilde{h}}{8}(k^- + k^+) + \frac{\tilde{h}^2}{8}$ | $-\left(\frac{3\tilde{h}}{8}k^- + \frac{\tilde{h}^2}{8}\right)$ | $\frac{\tilde{h}}{8}k^+$ |
| 1 | $\frac{1}{2}(k^- - k^+)$ | $-\frac{1}{2}k^-$ | $\frac{1}{2}k^+$ |
| 2 | $-\frac{1}{\tilde{h}}(k^- + k^+ + \tilde{h})$ | $\frac{1}{\tilde{h}}(k^- + \tilde{h})$ | $\frac{1}{\tilde{h}}k^+$ |

С учетом (5), (9) уравнение (4) для областей с постоянными значениями параметров $k^+$, $k^-$, $\varphi^+$ и $\varphi^-$ окончательно имеет вид

$$\sum_{m=1}^{2}\frac{\partial}{\partial x_m}\sum_{n=0}^{2} g_n^m(\gamma)\frac{\partial}{\partial x_m}a_n u^+ - d_1 u^+ = -d_2\varphi^+ - d_3\varphi^-, \quad (10)$$

где

$$g_n^m(\gamma) = \int_{x_3^+}^{x_3^-}\gamma\frac{(x_3 - x_3^0)^n}{n!}\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{n_m}\lambda_3\,dx_3; \quad (11)$$

$$d_1 = \gamma^+\frac{\lambda_1^+\lambda_2^+}{\lambda_3^+}\frac{1}{k^+} + \gamma^-\frac{\lambda_1^-\lambda_2^-}{\lambda_3^-}\frac{k^+ + \frac{\tilde{h}}{2}}{k^+\left(k^- + \frac{h}{2}\right)}; \quad (12)$$

$$d_2 = \gamma^+\frac{\lambda_1^+\lambda_2^+}{\lambda_3^+}\frac{1}{k^+} + \gamma^-\frac{\lambda_1^-\lambda_2^-}{\lambda_3^-}\frac{\frac{\tilde{h}}{2}}{k^+\left(k^- + \frac{h}{2}\right)}; \quad (13)$$

$$d_3 = \gamma^-\frac{\lambda_1^-\lambda_2^-}{\lambda_3^-}\frac{1}{k^- + \frac{h}{2}}. \quad (14)$$

Уравнение (10) дополняется граничными условиями при $x_m = \text{const}$, связанными с поведением потенциала или его нормальной производной. Указанные условия усредняются по координате $x_3$ и с учетом используемого разложения в ряд Тейлора (5) записываются в виде

$$\int_{x_3^+}^{x_3^-} u\lambda_3\,dx_3 = u^+\sum_{n=0}^{2}a_n P_n + \varphi^+\sum_{n=0}^{2}b_n P_n + \varphi^-\sum_{n=0}^{2}c_n P_n = f_1 \quad (15)$$

и

$$\int_{x_3^+}^{x_3^-}\gamma\frac{\partial u}{\partial x_m}\frac{\lambda_3}{\lambda_m}dx_3 = \frac{\partial u^+}{\partial x_m}\sum_{n=0}^{2}a_n P_n^m(\gamma) = f_2, \quad (16)$$

где

$$P_n = \int_{x_3^+}^{x_3^-}\frac{(x_3 - x_3^0)^n}{n!}\lambda_3\,dx_3; \quad (17)$$

$$P_n^m(\gamma) = \int_{x_3^+}^{x_3^-}\gamma\frac{(x_3 - x_3^0)^n}{n!}\frac{\lambda_3}{\lambda_m}dx_3, \quad (18)$$

$f_1$, $f_2$ — известные функции.

Если на границе областей $S_i$ и $S_j$ электропроводимость слоя меняется скачком от значения $\gamma_i$ до $\gamma_j$, то задаются условия сопряжения:

$$u_i^+\sum_{n=0}^{2}a_{ni}P_n + \sum_{n=0}^{2}(b_{ni}\varphi_i^+ + c_{ni}\varphi_i^-)P_n =$$

$$= u_j^+\sum_{n=0}^{2}a_{nj}P_n + \sum_{n=0}^{2}(b_{nj}\varphi_j^+ + c_{nj}\varphi_i^-)P_n; \quad (19)$$

$$\frac{\partial u_i^+}{\partial x_m}\sum_{n=0}^{2}a_{ni}P_n^m(\gamma_i) = \frac{\partial u_j^+}{\partial x_m}\sum_{n=0}^{2}a_{nj}P_n^m(\gamma_j). \quad (20)$$

Решение уравнения (10) с граничными условиями (15), (16), (19), (20) может быть выполнено либо численно, либо аналитически. В обоих случаях снижение на единицу размерности исходного уравнения определяет эффективность предлагаемого метода решения задачи.

Оценим точность решения на основе рассмотрения в цилиндрической системе координат ($x_1=\varphi$, $x_2=r$, $x_3=z$) типовой осесимметричной расчетной модели локальной гальванической неоднородности в виде дискового электрода радиусом $a$, расположенного на бесконечно протяженной поверхности основного металла в слое электролита толщиной $h$ (см. рис. 3, где через $\varphi_i$ обозначены значения стационарных электродных потенциалов каждого электрода, а через $\rho_i$ — их удельные переходные сопротивления).

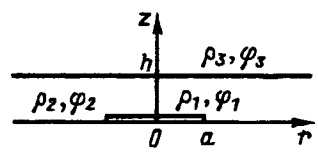



**Рис. 3.** Контрольная задача

Следует отметить, что на практике встречаются два основных варианта формулировки задачи:

1) внешний электрод с поверхностью $S^-$ электрически не связан с остальными электродами и является биполярным;

2) внешний электрод образует с остальными электродами короткозамкнутую гальваническую систему.

При этом в обоих случаях можно положить $\varphi^- = 0$ и ввести безразмерные потенциал, плотность тока и ток

$$U = \frac{u}{u_0}, \quad J = \frac{ja}{\gamma u_0}, \quad I = \frac{i}{\gamma a u_0},$$

где $u_0$ — масштаб потенциала, причем

$$u_0 = \begin{cases}\varphi_2 - \varphi_1 & \text{для варианта 1;}\\ \varphi_3 - \varphi_1 & \text{для варианта 2,}\end{cases}$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

а также безразмерные координаты

$$R = \frac{r}{a}, \quad Z = \frac{z}{a}, \quad H = \frac{h}{a}.$$

Потенциал $U$ удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{1}{R}\frac{\partial U}{\partial R} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = 0$$

и граничным условиям

$$U - k_1 \frac{\partial U}{\partial Z} = 1 \text{ при } Z = 0, \quad R \leqslant 1;$$

$$U - k_2 \frac{\partial U}{\partial Z} = \begin{cases} 0 \text{ для варианта } 1; \\ \Phi = (\varphi_3 - \varphi_2)/(\varphi_3 - \varphi_1) \text{ для варианта } 2; \end{cases}$$

при $Z = 0$, $R > 1$; $U + k_3 \frac{\partial U}{\partial Z} = 0$ при $Z = H$,

где $k_i = \rho_i \gamma / a$, $i = 1, 2, 3$.

В рамках разработанного метода для построения приближенного решения необходимо найти потенциал $U^+$ в двух подобластях ($U^+ = U_1^+$ при $R \leqslant 1$, $U^+ = U_2^+$; при $R > 1$) из уравнений

$$\frac{\partial^2 U_i^+}{\partial R^2} + \frac{1}{R}\frac{\partial U_i^+}{\partial R} - \alpha_i U_i^+ = -\beta_i \varphi_i^+, \quad i = 1, 2, \quad (21)$$

где согласно (11)—(18) с учетом того, что $P_0 = H, P_1 = 0, P_2 = \frac{H^3}{24}$, $P_n^2(\gamma) = P_n$, $g_n^2(\gamma) = RP_n$,

$$\alpha_i = \frac{d_{1i}}{\sum\limits_{n=0}^{2} a_{ni} g_n^2(\gamma)} = \frac{1}{H} \frac{\frac{1}{k_i} + \frac{1}{k_3} + \frac{H}{k_i k_3}}{1 + \frac{H}{3}\left(\frac{1}{k_i} + \frac{1}{k_3}\right) + \frac{H^2}{12 k_i k_3}};$$

$$\beta_i = \frac{d_{2i}}{\sum\limits_{n=0}^{2} a_{ni} g_n^2(\gamma)} = \frac{1}{H} \frac{\frac{1}{k_i} + \frac{H}{k_i k_3}}{1 + \frac{H}{3}\left(\frac{1}{k_i} + \frac{1}{k_3}\right) + \frac{H^2}{12 k_i k_3}};$$

$$\varphi_1^+ = 1, \quad \varphi_2^+ = \begin{cases} 0 \text{ для варианта } 1; \\ \Phi \text{ для варианта } 2. \end{cases}$$

При этом на границе подобластей при $R = 1$ должны выполняться условия

$$U_1^+ \xi_1 - \varphi_1^+ g_1 = U_2^+ \xi_2 - \varphi_2^+ g_2;$$

$$\frac{\partial U_1^+}{\partial R} \xi_1 = \frac{\partial U_2^+}{\partial R} \xi_2,$$

где согласно (19), (20)

$$\xi_i = \sum_{n=0}^{2} a_{ni} P_n = H \frac{1 + \frac{H}{3}\left(\frac{1}{k_i} + \frac{1}{k_3}\right) + \frac{H^2}{12 k_i k_3}}{1 + \frac{H}{2k_3}};$$

$$g_i = \sum_{n=0}^{2} b_{ni} \varphi_i^+ = \frac{H^2}{3k_i} \frac{1 + \frac{H}{4k_3}}{1 + \frac{H}{2k_3}}.$$

Кроме того, при $R \to \infty$

$$U_2^+ = \frac{\beta_2}{\alpha_2} \varphi_2^+.$$

Решения уравнений (21) имеют вид

$$U_1^+ = \frac{\beta_1}{\alpha_1} + A I_0(\sqrt{\alpha_1} R);$$

$$U_2^+ = \frac{\beta_2}{\alpha_2} \varphi_2^+ + B K_0(\sqrt{\alpha_2} R),$$

где

$$A = -\frac{\left[\frac{\beta_1}{\alpha_1}\xi_1 - g_1 - \left(\frac{\beta_2}{\alpha_2}\xi_2 - g_2\right)\varphi_2^+\right] \frac{\sqrt{\alpha_2}}{\sqrt{\alpha_1}} \frac{1}{\xi_1} K_1(\sqrt{\alpha_2})}{K_0(\sqrt{\alpha_2}) I_1(\sqrt{\alpha_1}) + \frac{\sqrt{\alpha_2}}{\sqrt{\alpha_1}} K_1(\sqrt{\alpha_2}) I_0(\sqrt{\alpha_1})};$$

$$B = -\frac{\left[\frac{\beta_1}{\alpha_1}\xi_1 - g_1 - \left(\frac{\beta_2}{\alpha_2}\xi_2 - g_2\right)\varphi_2^+\right] \frac{1}{\xi_1} I_1(\sqrt{\alpha_1})}{K_0(\sqrt{\alpha_2}) I_1(\sqrt{\alpha_1}) + \frac{\sqrt{\alpha_2}}{\sqrt{\alpha_1}} K_1(\sqrt{\alpha_2}) I_0(\sqrt{\alpha_1})};$$

$I_0$, $I_1$, $K_0$, $K_1$ — бесселевы функции от чисто мнимого аргумента.

Безразмерный ток дискового электрода

$$I = \frac{2\pi}{k_1}\left[\frac{1}{2}\left(1 - \frac{\beta_1}{\alpha_1}\right) - \frac{A}{\sqrt{\alpha_1}} I_1(\sqrt{\alpha_1})\right].$$

Рассмотрим результаты численных расчетов для характерного случая, когда $\varphi_3 = \varphi_2$. При этом, как нетрудно убедиться, решения для вариантов 1 и 2 совпадают. В качестве контрольных значений использовались результаты расчета по точным формулам, которые могут быть получены при $k_1 = k_2$.

Результаты расчета безразмерной поверхностной плотности тока $J$ в характерных точках и безразмерного суммарного тока при $k_3 = 200$ и различных $H$ и $k_1$ приведены в табл. 2. Значения, полученные предлагаемым методом, приведены в числителе; в знаменателе указаны контрольные значения.

*Таблица 2*

| $H$ | $k_1$ | $J_1^+(0)$ | $J_1^+(1)$ | $J_2^+(1)$ | $J_1^-(0)$ | $I$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,01 | 20 | −0,0141 / −0,0141 | −0,0325 / −0,0325 | 0,0175 / 0,0175 | 0,00359 / 0,00359 | −0,07028 / −0,07028 |
| 0,1 | 20 | −0,0370 / −0,0370 | −0,0417 / −0,0417 | 0,00826 / 0,00830 | 0,00129 / 0,00129 | −0,1235 / −0,1236 |
| 1,0 | 20 | −0,0466 / −0,0467 | −0,0472 / −0,0477 | 0,00196 / 0,00232 | 0,000218 / 0,000223 | −0,1474 / −0,1480 |
| 0,01 | 2 | −0,00638 / −0,00639 | −0,270 / −0,270 | 0,230 / 0,230 | 0,00494 / 0,00494 | −0,2326 / −0,2326 |
| 0,1 | 2 | −0,118 / −0,118 | −0,308 / −0,312 | 0,184 / 0,188 | 0,00379 / 0,00379 | −0,6407 / −0,6413 |
| 1,0 | 2 | −0,324 / −0,326 | −0,360 / −0,399 | 0,0685 / 0,101 | 0,000942 / 0,000983 | −1,075 / −1,116 |

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Анализ данных расчетов показывает высокую точность предложенного метода. При реальных значениях электрохимических и геометрических параметров методическая погрешность в определении коррозионных токов обычно не превышает долей процента.

Таким образом, разработан эффективный метод расчета электрического поля в тонких проводящих слоях, позволяющий снизить на единицу размерность задачи и избежать трудностей, связанных с решением исходного дифференциального уравнения при малой толщине слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Olsen R.** Integral equations for electrostatics problems with thin dielectric or conducting layers. — IEEE Trans. Electr. Insulat., 1986, vol. 21, № 4, p. 565—573.

2. **Метод** расчета распределения потенциала и тока под тонкой пленкой электролита / Е.А. Свядощ, Ю.Я. Иоссель, Г.Э. Кленов, А.М. Вишневский — Электрохимия, 1978, т. XIV, вып. 2, с. 219—226.

3. **Vishnevsky A.** and **Lapovok A.** Conservative methods in boundary-element calculations of static fields. — IEEE Proc., Part A., 1995, vol. 142, № 2, p. 151—156.

4. **Vishnevsky A., Krasnov I.** and **Lapovok A.** Calculation of static magnetisation for thin-walled constructions by boundary element method. — IEEE Trans. Magn., 1993, vol. 29, № 3, p. 2152—2155.

5. **Цейтлин Л.А.** Об определении магнитных и электрических полей тонких слоев и оболочек. — ЖТФ, 1958, т. XXVIII, вып. 6, с. 1326—1329.

*[26.04.95]*

*Авторы:* ***Вишневский Александр Михайлович*** *окончил в 1969 г. приборостроительный факультет Ленинградского кораблестроительного института. В 1988 г. защитил докторскую диссертацию по тематике, связанной с разработкой методов и технических средств для математического моделирования стационарных электрических и магнитных полей. Начальник сектора ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, Санкт-Петербург.*

***Лаповок Андрей Яковлевич*** *окончил в 1978 г. факультет автоматики и вычислительной техники Ленинградского электротехнического института. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию по тематике, связанной с численными методами расчета статических магнитных полей. Старший научный сотрудник ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, Санкт-Петербург.*

# Асинхронный сварочный генератор

**ДЖЕНДУБАЕВ А.-З.Р.**

*Описана конструкция асинхронного сварочного генератора. Показано, что при использовании конденсаторов типа К78-17 асинхронный сварочный генератор имеет меньшую массу по сравнению с генераторами традиционного исполнения. Приведены уравнения динамических и статических режимов работы (без учета полупроводникового выпрямителя). Представлены схемы замещения и результаты расчета внешних характеристик генератора.*

Ключевые слова: *сварочный генератор, асинхронная машина, конденсаторы, динамический режим, статический режим*

*Design of asynchronous welding generator is described. Is shown that by use of capacitors of a type K78-17 the asynchronous welding generator has smaller weight in comparison with generators of conventional execution. Equations of dynamic and static modes of operations (without the account of a semiconductor rectifier) are indicated. The circuits of replacement and results of account of the external characteristics of a generator are submitted.*

Key words: *welding generator, asynchronous generator, capacitor, dynamic mode of operation, static mode operation*

В автономных устройствах ручной дуговой электросварки используют бесконтактные вентильные генераторы повышенной частоты, выполненные на базе синхронных машин индукторного типа [1]. Известно, что масса этих генераторов с учетом устройств для их возбуждения больше, чем у асинхронных генераторов (АГ). Следует отметить и то, что в настоящее время созданы высокоэффективные легкие конденсаторы типа К78-17, использование которых позволяет существенно улучшить массогабаритные показатели АГ [2], что в свою очередь, способствует расширению области применения АГ, в частности в устройствах ручной дуговой электросварки.

Известно несколько конструкций АГ, которые могут быть использованы для этой цели [3—5].

Ниже описывается предлагаемая автором более совершенная конструкция сварочного АГ

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

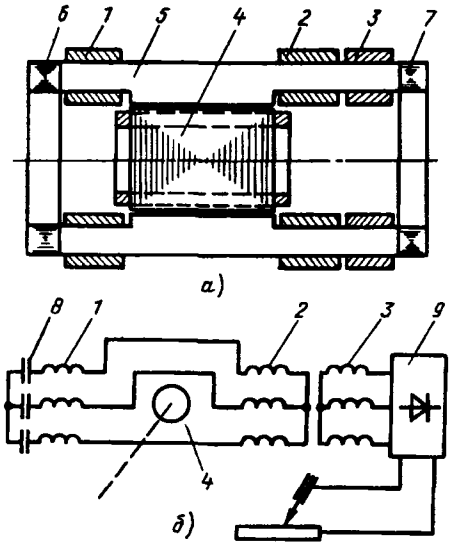



**Рис. 1**

(рис. 1,*а*). Трехфазный асинхронный сварочный генератор (АСГ) имеет две конденсаторные обмотки *1*, *2*, одну генераторную обмотку *3* и короткозамкнутый ротор *4* обычной конструкции. Катушки статорных обмоток *1*, *2*, *3* охватывают пакеты зубцов статора *5*, которые расположены аксиально. По торцам зубцов закреплены два кольцевых ярма *6*, *7*. Катушки конденсаторных обмоток *1*, *2* (рис. 1,*б*) соединены последовательно и подключены к конденсаторам возбуждения *8*. Сварочная цепь постоянного тока получает питание от генераторной обмотки *3* через полупроводниковый выпрямитель (ПВ) *9*.

Экспериментальные исследования опытного образца АСГ, в котором использован ротор от асинхронного двигателя мощностью 5,5 кВт, показали, что генератор обеспечивает надежное возбуждение и высокую стабильность горения сварочной дуги. При проведении сварочных работ применялись электроды Э46-МР-ЗФК-д-УДЗ, Э46-АМО-21-3-УДА и Э42А-УОНИИ-13/45-УД диаметрами 2, 3, 4, 5 мм. Разбрызгивание металла находилось в допустимых пределах. Механические испытания и проверка радиографическим методом сварного стыка показали, что по качеству сварки АСГ не уступает серийному генератору и может быть использован для сварки стальных труб газопроводов.

Для анализа массогабаритных показателей воспользуемся таблицей, в которой представлены основные характеристики серийных сварочных генераторов индукторного [6] и коллекторного [1] типов, а также показатели опытного образца АСГ и показатели АСГ, полученные расчетом. При анализе показателей АСГ предполагалось, что возбуждение генератора осуществляется от конденсаторов типа К78-17. Как видно из таблицы,

| Тип генератора | ПН, % | $I_н$, А | $U_н$, В | $U_{хх}$, В | $n$, об/мин | Масса, кг | Удельная масса, кг/кВт |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ГД-311 | 60 | 315 | 32 | 70 | 3000 | 164 | 16,3 |
| ГД-500 | 60 | 500 | 40 | 90 | 3000 | 400 | 20 |
| АСГ (опытный образец) | — | 170 | 26,8 | 77 | 3000 | 78 | 17 |
| АСГ (расчет) | 100 | 400 | 36 | 90 | 3000 | 167 | 11,6 |

наилучшие характеристики имеет расчетный АСГ, а показатели опытного образца АСГ приближаются к показателям сварочного генератора индукторного типа.

Следует отметить, что первоначально при расчете и создании опытного образца предполагалось его использование только в двигательном режиме. В силу этого площадь поперечного сечения зубцов статора составляет половину площади зубцов ротора, т. е. опытный образец не оптимизирован для работы в генераторном режиме и в этом отношении далек от совершенства. Некоторый запас имеется и по использованию конденсаторов. Оптимальная частота генерируемых колебаний для сварочных генераторов лежит в диапазоне 150—400 Гц [1], поэтому переход на повышенную частоту позволит уменьшить емкость возбуждения АСГ.

Результаты расчета АСГ, которые представлены в таблице, являются предварительными, так как они получены без учета влияния ПВ. Такой подход обусловлен тем, что наличие ПВ делает АСГ близким к вентильному генератору. Полный анализ уравнений такого генератора — достаточно трудоемкая задача [7]. Но еще более трудной задачей является анализ уравнений АСГ, поскольку наряду с влиянием ПВ необходимо учитывать и специфические особенности генератора: разветвленная магнитная система; три обмотки на статоре; емкостное самовозбуждение; работа на электрическую дугу и, как следствие — частые КЗ на выходе ПВ.

В связи с этим задача исследования АСГ была разбита на два этапа. Первый — анализ уравнений динамических и статических режимов АСГ без учета ПВ и создание на их основе программы предварительного расчета и проектирования АСГ. Второй — исследование совместной работы генератора и ПВ на электрическую дугу и повышение точности расчета.

Вопросам первого этапа посвящен материал, излагаемый ниже. Математическая модель двухполюсного АСГ в заторможенной трехфазной системе координат $\alpha$, $\beta$, $\gamma$ представлена на рис. 2. Выбор такой системы координат обусловлен тем, что на втором этапе исследований будет учи-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

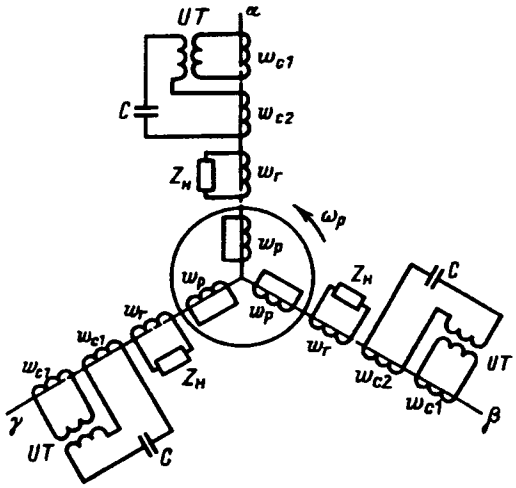



Рис. 2

тываться влияние ПВ, который имеет переменную структуру силовой цепи.

Непрерывно повторяющиеся КЗ двух фаз во время коммутации диодов ПВ чередуются с несимметричной нагрузкой в межкоммутационном интервале [8, 9]. Это приводит к появлению несинусоидальных напряжений и токов в генераторной обмотке. В этих условиях использование системы координат $\alpha$, $\beta$ или $d$, $q$ неправомерно, так как поля в воздушном зазоре трехфазной и преобразованной двухфазной машины будут отличаться друг от друга [10, 11]

С учетом общепринятых допущений и ограничений уравнения напряжений имеют следующий вид:

$$\left.\begin{aligned}
&-\mathbf{U}_{C1} = R_{C1}\,\mathbf{I}_{C1} + p\,\Psi_{C1};\\
&-\mathbf{U}_{C2} = R_{C2}\,\mathbf{I}_{C2} + p\,\Psi_{C2};\\
&-\mathbf{U}_{г} = R_{г}\,\mathbf{I}_{г} + p\,\Psi_{г};\\
&0 = R_{р}\,\mathbf{I}_{р} + p\,\Psi_{р} - j\omega_{р}\,\Psi_{р};\\
&\mathbf{U}_{C} = \mathbf{U}_{C2} + \mathbf{U}_{C1}/k_{uC1} = \frac{1}{C}\int_0^t \mathbf{I}_{C2}\,dt;\\
&\mathbf{I}_{C1} = \mathbf{I}_{C1}\cdot k_{iC1};\\
&\mathbf{U}_{г} = R_{н}\,\mathbf{I}_{г} + L_{н}\,p\,\mathbf{I}_{г},
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где $\mathbf{U}_{C1}$, $\mathbf{U}_{C2}$ — изображающие векторы напряжений первой и второй конденсаторных обмоток; $\mathbf{U}_C$ — изображающий вектор напряжения на конденсаторах возбуждения; $\mathbf{U}_г$ — изображающий вектор напряжения генераторной обмотки; $\mathbf{I}_{C1}$, $\mathbf{I}_{C2}$, $\mathbf{I}_г$, $\mathbf{I}_р$ — изображающие векторы токов конденсаторных обмоток, генераторной обмотки и обмотки ротора; $R_{C1}$, $R_{C2}$, $R_г$, $R_р$ — активные сопротивления обмоток; $C$ — емкость конденсаторов возбуждения; $\Psi_{C1}$, $\Psi_{C2}$, $\Psi_г$, $\Psi_р$ — соответствующие изображающие векторы потокосцеплений обмоток; $R_н$, $L_н$ — активное сопротивление и индуктивность нагрузки; $\omega_р$ — электрическая угловая скорость ротора; $p$ — символ дифференцирования по времени; $k_{uC1}$, $k_{iC1}$ — коэффициенты приведения напряжений и токов первой конденсаторной обмотки (следует отметить, что и остальные обмотки АСГ приведены ко второй конденсаторной обмотке; знаки приведения опущены).

Идеальный трансформатор (ИТ), изображенный на модели рис. 2, служит в качестве масштабного устройства с коэффициентом $k_{uC1}$. Это позволяет сохранить значение напряжения на конденсаторах возбуждения таким же, как и до приведения первой конденсаторной обмотки.

С учетом обозначений одноименных выводов (для каждой пары обмоток) и положительных направлений токов в соответствии с рис. 3 уравнения установившегося режима генератора, полученные из (1) путем замены $p$ на $j\omega$, имеют следующий вид:

$$\left.\begin{aligned}
&-\dot{U}_{C1}=(r_{C1}+jx_{\delta C1})\dot{I}_{C1}+jx_{C1C2г}\dot{I}_{C1C2г}+jx_{C1р}\dot{I}_{C1р};\\
&-\dot{U}_{C2}=(r_{C2}+jx_{\delta C2})\dot{I}_{C2}-jx_{C1C2г}\dot{I}_{C1C2г}+jx_{C2гр}\dot{I}_{C2гр};\\
&-\dot{U}_{г}=(r_{г}+jx_{\delta г})\dot{I}_{г}-jx_{C1C2г}\dot{I}_{C1C2г}+jx_{C2гр}\dot{I}_{C2гр};\\
&0=(r_{р}/s+jx_{\delta р})\dot{I}_{р}+jx_{C1р}\dot{I}_{C1р}+jx_{C2гр}\dot{I}_{C2гр};\\
&\dot{U}_{C2}=\dot{U}_{C1}/k_{uC1}=-jx_{C}\dot{I}_{C2};\\
&\dot{U}_{г}=(r_{н}+jx_{н})\dot{I}_{г};\quad \dot{I}_{C1}=\dot{I}_{C2}k_{iC1},
\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

где $x_{\delta C1}$, $x_{\delta C2}$, $x_{\delta г}$, $x_{\delta р}$ — индуктивные сопротивления рассеяния обмоток АСГ; $x_{C1C2г}$ — индуктивное сопротивление, обусловленное наличием магнитной связи между первой, второй конденсаторными обмотками и генераторной обмоткой; $x_{C1р}$ — сопротивление взаимоиндуктивности между первой конденсаторной обмоткой и ротором; $x_{C2гр}$ — соответственно между второй конденсаторной обмоткой, генераторной обмоткой и ротором; $s$ — скольжение; $x_C$ — емкостное сопротивление конденсаторов возбуждения; $x_н$ — индуктивное сопротивление нагрузки; $\dot{I}_{C1C2г}=\dot{I}_{C1}-\dot{I}_{C2}-\dot{I}_г$, $\dot{I}_{C1р}=\dot{I}_{C1}+\dot{I}_р$, $\dot{I}_{C2гр}=\dot{I}_{C2}+\dot{I}_г+\dot{I}_р$ — намагничивающие токи.

Этим уравнениям соответствует схема замещения, изображенная на рис. 4.

Разветвленная магнитная система АСГ затрудняет расчет динамических и статических режимов,

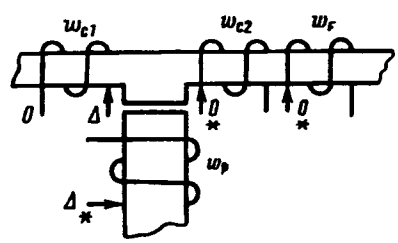



Рис. 3

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

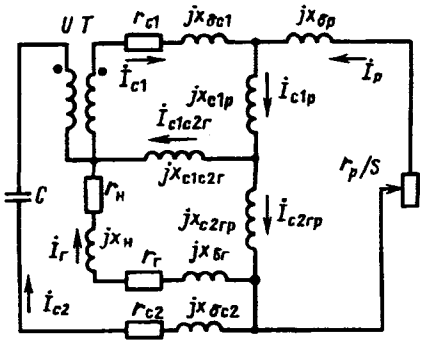



**Рис. 4**

поскольку необходимо учитывать, что все взаимные индуктивности, с помощью которых можно выразить потокосцепления в (1), и соответствующие индуктивные сопротивления в (2) являются нелинейными величинами.

Следует отметить, что при расчете АГ обычной конструкции, как правило, учитывают только одну нелинейность, обусловленную основным потоком. Для определения нелинейностей АСГ воспользуемся схемой замещения магнитной цепи, которая представлена на рис. 5.

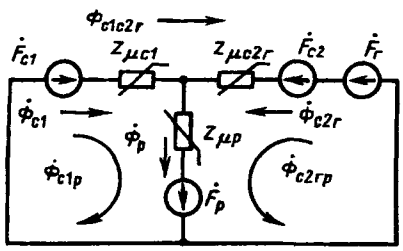



**Рис. 5**

Здесь $z_{\mu C1}$, $z_{\mu C2г}$, $z_{\mu р}$ — полные магнитные сопротивления, которые включают в себя сопротивления элементарных участков (ярма, зубцов) с простой конфигурацией и заданной магнитной характеристикой; $F_{C1}$, $F_{C2}$, $F_г$, $F_р$ — намагничивающие силы обмоток; $\dot\Phi_{C1}$ — поток первой конденсаторной обмотки; $\dot\Phi_{C2г}$ — поток, который пронизывает генераторную обмотку и вторую конденсаторную обмотку; $\dot\Phi_р$ — поток ротора; $\dot\Phi_{C1р}$ — поток, пронизывающий первую конденсаторную обмотку и ротор; $\dot\Phi_{C2гр}$ — поток, силовые линии которого охватывают вторую конденсаторную, генераторную обмотки и обмотку ротора; $\dot\Phi_{C1C2г}$ — поток, проходящий через генераторную и конденсаторные обмотки.

Схеме замещения магнитной цепи соответствует следующая система нелинейных уравнений:

$$\left.\begin{aligned}\dot\Phi_{C1}&=\dot F_{C1р}\frac{z_{\mu C2г}}{z^2}+\dot F_{C1C2г}\frac{z_{\mu р}}{z^2}=\dot\Phi_{C1р}+\dot\Phi_{C1C2г};\\ \dot\Phi_{C2г}&=\dot F_{C2гр}\frac{z_{\mu C1}}{z^2}-\dot F_{C1C2г}\frac{z_{\mu р}}{z^2}=\dot\Phi_{C2гр}-\dot\Phi_{C1C2г},\end{aligned}\right\}\quad(3)$$

где $z^2 = z_{\mu C1}z_{\mu C2г} + z_{\mu C1}z_{\mu р} + z_{\mu р}z_{\mu C2г}$;

$\dot F_{C1р} = \dot F_{C1} + \dot F_р$; $\dot F_{C1C2г} = \dot F_{C1} - \dot F_{C2} - \dot F_г$;

$\dot F_{C2гр} = \dot F_{C2} + \dot F_г + \dot F_р$.

Система уравнений (3) позволяет найти нелинейности, которые входят в уравнения (1), (2).

На рис. 6 представлены внешние характеристики АСГ, которые получены при расчете по уравнениям (2), (3) с использованием методики, описанной в [12]. В (2) и (3) использовались параметры опытного образца, которые были определены экспериментально. Сравнение расчетных значений установившегося режима с данными исследований опытного образца показало, что их расхождение составило менее 12%.

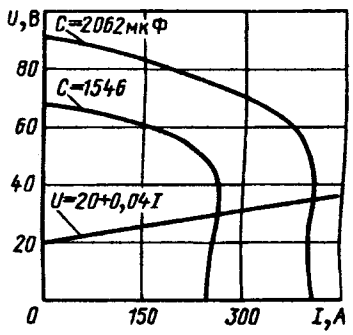



**Рис. 6**

На основе известных методик проектирования асинхронных машин была разработана программа на языке FORTRAN-77. Эта программа позволяет по заданной мощности осуществить расчет параметров, размеров и характеристик АСГ. Электромагнитные нагрузки принимались в соответствии с рекомендациями [8, 13]. При расчете АСГ предполагался режим работы генератора с ПН=100%, а не 60%, как у большинства сварочных генераторов, конструктивный коэффициент массы был принят равным 1,7 (в лучших конструкциях электрических машин он приближается к величине 1,4), т. е. имеется определенный резерв для улучшения показателей, которые представлены в таблице. У автора нет возможности по результатам проектирования изготовить в заводских условиях экспериментальный образце АСГ и таким образом проверить точность предварительного расчета. Однако, если даже предположить погрешность расчета в 30—40%, то и в этом случае преимущества АСГ очевидны.

Следует отметить, что у АСГ имеется существенный недостаток, который характерен и для АГ обычной конструкции с параллельным включением конденсаторов возбуждения, — значительный намагничивающий ток в режиме холостого хода.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таким образом, исследования показали, что использование АСГ в устройствах ручной дуговой электросварки имеет определенные перспективы и вполне оправдано. Полученные схемы замещения магнитной и электрической цепей отражают реальные физические процессы, происходящие в генераторе, и могут быть использованы при расчете и анализе АСГ.

*СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. **Оборудование** для дуговой сварки: Справочное пособие / Под ред. В.В. Смирнова. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
2. **Джендубаев А.-З.Р.** Об удельной массе асинхронных генераторов с возбуждением от конденсаторов типа К78-17. — Электротехника, 1995, № 1.
3. **А.с. 980971 (СССР).** Источник питания сварочной дуги /В.С. Фришман, В.К. Капленко, С.З. Эвентов. — Опубл. в Б.И., 1982, № 46.
4. **Пат. 237406 (ГДР).** Burstenljser schweib Generator / Julke Edmund, Dassel Jurgen.
5. **А.с. 1697204 (СССР).** Трехфазный асинхронный генератор / А.-З.Р. Джендубаев, Л.Я. Шапиро. — Опубл. в БИ, 1991, № 45.
6. **Новая** серия вентильных генераторов для ручной дуговой сварки / А.В. Паштукас, И.И. Каросас, С.А. Диржис, Н.А. Панфилов. — Электротехническая промышленность. Сварка, 1975, вып. 4 (31).
7. **Бут Д.А.** Анализ и расчет вентильных генераторов. — Электричество, 1987, № 7.
8. **Балагуров В.А.** Проектирование специальных электрических машин переменного тока. — М.: Высшая школа, 1982.
9. **Забродин Ю.С.** Промышленная электроника. — М.: Высшая школа, 1982.
10. **Глазенко Т.А., Хрисанов В.И.** Полупроводниковые системы импульсного асинхронного электропривода малой мощности. — Л.: Энергоатомиздат, 1983.
11. **Копылов И.П.** Математическое моделирование электрических машин. — М.: Высшая школа, 1987.
12. **Джендубаев А.-З.Р.** Статические режимы работы автономного асинхронного генератора с двумя обмотками статора. — Изв. РАН. Энергетика, 1994. № 1.
13. **Проектирование** электрических машин / Под ред. И.П. Копылова. — М.: Энергоатомиздат, 1993.

*[24.06.95]*

*Автор: **Джендубаев Абрек-Заур Рауфович** окончил в 1980 г. энергостроительный факультет Ставропольского политехнического института (филиал в г. Черкесске). В 1992 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Автономный асинхронный генератор с двумя обмотками статора и конденсаторным самовозбуждением» в Московском энергетическом институте. Доцент кафедры электроснабжения Карачаево-Черкесского технологического института.*

# Новый метод и устройства для контроля электрических свойств порошковых квазидиэлектрических структур

**ШЛЯХТЕНКО П.Г.**

*Разработан метод и соответствующие устройства для контроля проводящих свойств порошковых материалов, применяемых для нанесения покрытий с использованием сильного электрического поля. В отличие от существующих методов обсуждаемый метод позволяет проводить измерения в условиях, максимально приближенных к производственным. Статистическая ошибка измерений по этому методу при измерениях на синтетическом ворсе значительно меньше, чем при использовании существующего метода. Количество используемого исследуемого материала в одной пробе в двести раз меньше.*

Ключевые слова: *диэлектрические порошки, синтетический ворс, электрические свойства, неразрушающие методы контроля, электрофлокирование*

*The method and corresponding devices for controlling the conductive characteristics of the powder materials, which are used for applying covering with help of the severe electric field, is elaborated. Our method is distinction to the existing ones takes it possible to make the measurements in the conditions which are maximum neared to the manufacture. According to this method the statistic error of experiment, while working with synthetic pile is much less than with using the existing method. The quantity of the material under study in one sample is less in two hundred times.*

Key words: *dielectric powders, synthetic pile, electric properties*

В настоящее время основным методом контроля проводимости порошковых материалов, используемых для электростатического нанесения покрытий, является измерение значения сопротивления заданного объемного или массового количества исследуемого материала, зажатого при

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

определенном давлении между металлическими электродами. Наиболее употребительным датчиком такого типа является устройство фирмы Maag Flockmaschinen [1] которое широко используется, например, при контроле качества ворса, применяемого при нанесении ворсовых покрытий методом электрофлокирования, во всех заводских лабораториях мира [2, 3].

Точность измерений этим методом определяется стабильностью контактных условий между частицами и стабильностью пространственного заполнения этими частицами измерительной ячейки и зависит не только от собственной проводимости исследуемых частиц, но и от их геометрии, вида поверхностной обработки частиц, влажности и таких технологических параметров частиц, как «сыпучесть» и «разделяемость». Ошибка, вносимая нестабильностью только этих параметров, достигает на образцах капронового ворса при измерениях этим методом 50%.

Попытка [3] снизить эту ошибку за счет приложения к измерительным электродам большого давления (более $150 \cdot 10^5$ Па) привела к резкому уменьшению значения измеряемого сопротивления за счет уменьшения контактного сопротивления между волокнами, но значительно увеличила время одного измерения. Последнее обусловлено ростом времени релаксации процесса перераспределения давления в измерительном объеме и связанным с этим обстоятельством дрейфом тока, протекающего через измерительные электроды, что обусловлено не только изменением пространственной плотности, но также изменением влажности и температуры при столь значительном росте давления в измерительной ячейке. Эти новые недостатки (при сохранении старых) являются, по-видимому, причиной того, что метод [3] в заводской лаборатории в настоящее время не используется.

Общим недостатком вышеупомянутых методов измерения является то, что измеряемая величина сопротивления косвенным и аналитически неизвестным образом связана с собственной проводимостью отдельных частиц, которая определяет способность этих частиц приобретать заряд при контакте с высоковольтным электродом. Условия, в которых проводятся измерения (величина напряженности электрического поля, влажность, контактные условия) в этих методах, также существенно отличаются от производственных условий, в которых контролируемое покрытие эксплуатируется.

Фирма Maag Flockmaschinen выпускает еще один прибор для контроля качества ворса (его «прыгучести») [1, 3]. Измерения с помощью этого устройства происходят в условиях, близких к условиям электрофлокирования. Суть метода, реализованного в этом устройстве, заключается в следующем. Заданное массовое количество исследуемых частиц помещается на нижний электрод (плоский и горизонтальный) и подается высокое постоянное напряжение между этим электродом и верхним плоским горизонтальным электродом, расположенным на определенном расстоянии от нижнего. Исследуемые частицы движутся между ними, перезаряжаясь на электродах. Одноименно заряженные частицы при этом отталкиваются, и они быстро разлетаются из промежутка между электродами. Измерительным параметром является «время разлетания», т. е. время, в течение которого большая часть исследуемых частиц улетит.

Основным недостатком этого метода и устройства является его субъективность. Сами авторы метода отмечают, что у некоторых исследуемых образцов часть частиц остается на нижнем электроде и вообще не улетает.

В [4] был предложен принципиально новый метод контроля проводимости частиц, свободный от вышеупомянутых недостатков.

На рис. 1,*а* представлена схема лабораторного устройства для этого метода. Устройство включает амперметр *1* для измерения тока, протекающего в цепи, которая содержит высоковольтный выпрямитель *2* и горизонтальные криволинейные электроды *3* и *4*. Определенное массовое или объемное количество исследуемых частиц *5* помещают на нижнем электроде *3*. Электроды *3* и *4* помещены внутри ветрозащитной камеры *6*. После включения источника *2* частицы заряжаются на нижнем электроде *3* и под действием электрических сил движутся в неоднородном электрическом поле к верхнему электроду, перезаряжаются на нем, движутся в обратном направлении и т. д. Для обеспечения стабильного движения частиц между электродами в этом устройстве использован физический эффект, обнаруженный в [5] и объясненный в [6].

Эффект заключается в том, что мелкие частицы (например ворс), заряженные при контакте с электродом, при движении в неоднородном электрическом поле отклоняются в сторону уменьшения его напряженности. Электроды *3* и *4* имеют такую конфигурацию, что вследствие действия отмеченного эффекта исследуемые частицы движутся вблизи вертикальной оси симметрии и практически не разлетаются. Следует отметить, что такая конфигурация электродов обратна конфигурации электродов, используемых для той же цели в системах безверетенного прядения, предложенных в [7] для длинных хлопковых волокон, т. е. обсуждаемый эффект, обнаруженный в [5], не является тривиальным.

В [4] было показано, что чем выше прово-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

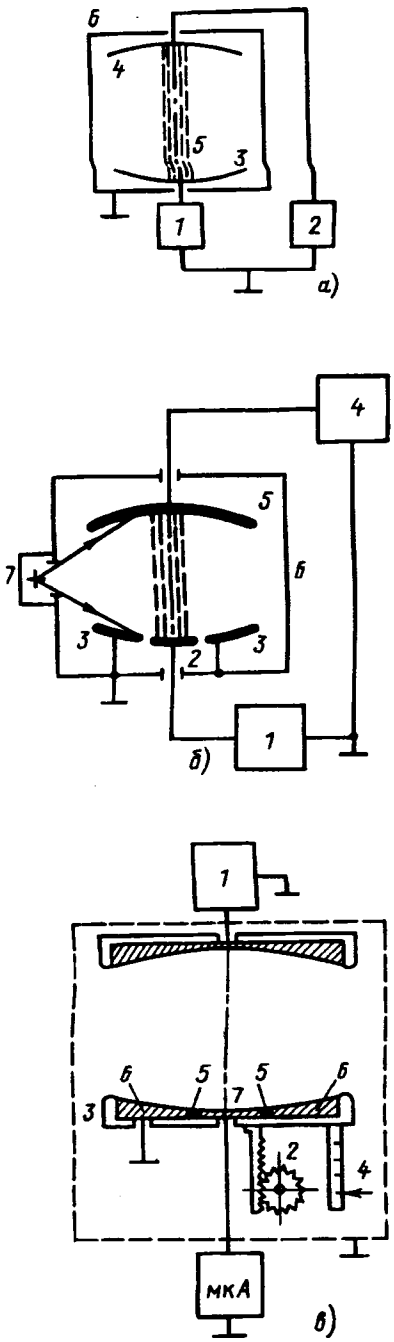



**Рис. 1.** Схемы устройства по способу [3] (*а*), способу [8] (*б*) и модифицированного устройства (*в*)

димость частиц, тем быстрее они заряжаются на электроде *3* до их отрыва от этого электрода. Это приводит к тому, что с ростом проводимости частиц увеличивается значение тока, регистрируемое амперметром *1* и обусловленное переносом заряда между электродами *3* и *4* исследуемыми частицами. Количество исследуемых частиц и геометрия устройства подбираются так, чтобы обеспечить одинаковость условий зарядки для каждой частицы при ее контакте с электродами. Для устройства, представленного на рис. 1,*а*, это количество составляло 10—20 мг, т. е. было в 200 раз меньше, чем при измерениях на синтетическом ворсе методом [1]. Следует также отметить, что методом [4] измеряется способность частиц приобретать заряд в условиях, которые практически совпадают с технологическими условиями электрофлокирования (величина напряжения между электродами, расстояние между электродами, влажность, температура), т. е. в условиях, в которых покрытие с этим контролируемым качеством частиц эксплуатируется.

В [8] предложена модификация способа [4], в которой повышена точность измерений за счет устранения паразитных токов утечки, связанных с коронированием внешних частей электродов. На рис. 1,*б* приведена схема лабораторного устройства для этого способа контроля. В этом устройстве нижний электрод состоит из двух частей: внешней и внутренней, симметричных относительно вертикальной оси, которые разделены воздушным промежутком. Внешняя часть электрода *3* заземлена. Измерительный прибор *1* подсоединен к центральной части электрода *2* и измеряет только ток, обусловленный переносом заряда исследуемыми частицами, движущимися между верхним и нижним электродами.

К недостатку устройства относится наличие щели между электродами *3* и *2*, которая создает трудности при эксплуатации прибора вследствие дрейфа тока, связанного с «выходом из игры» частиц, попавших в эту цель. Эта проблема была решена в модификации устройства, представленного на рис. 1,*в* [9]. Здесь щель между внешней и внутренними частями нижнего электрода заполнена твердым диэлектриком *5*. Дополнительным преимуществом этого устройства является возможность устанавливать нижний электрод *6* с помощью червячной передачи *2* и указателя *4* на любом желаемом расстоянии от верхнего электрода. Это позволяет использовать устройство не только для контроля качества частиц, но и для моделирования на нем оптимальных технологических режимов электрофлокирования. В устройстве на рис. 1,*в*, как и в устройстве на рис. 1,*б*, предусмотрена возможность визуального наблюдения движения частиц между электродами.

В [10] проведен теоретический анализ обсуждаемого метода. С учетом допущения об отсутствии влияния сил сопротивления среды движению частиц была получена формула для среднего тока, протекающего между горизонтальными электродами:

$$I=\frac{M}{m\tau \ln\frac{Q^2}{(Q-q_1)(Q-q_2)}}\left[(A_1+A_2)\frac{U}{H}+(B_1+B_2)\right], \quad (1)$$

где $M$ — масса исследуемых частиц; $m$ — масса

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

одной частицы; $\tau$ — постоянная времени зарядки частиц на электроде; $Q$ — максимальная величина избыточного заряда на закрепленной на электроде частице; $q_1$ — величина избыточного заряда, приобретаемого частицей на нижнем электроде; $q_2$ — величина избыточного заряда, приобретаемого частицей на верхнем электроде; $U$ — величина напряжения между электродами; $H$ — расстояние между электродами; $A_1, A_2, B_1, B_2$ — константы, зависящие от геометрических параметров частиц, определенные из экспериментальных зависимостей величины среднего избыточного заряда, получаемого частицами на верхнем и нижнем электродах, от величины $U$ при линейной аппроксимации этих зависимостей.

Для проверки правомочности приближений, сделанных при выводе формулы (1), были проведены эксперименты на действующем макете устройства (рис. 1,*в*) с образцами промышленного вискозного ворса одной геометрии, применяемого для нанесения покрытий типа искусственной замши методом электрофлокирования.

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости тока, измеренного устройством, от $1/H$ (рис. 2,*а*), от $U$ (рис. 2,*б*), от $M$ (рис. 2,*в*). Тот факт, что зависимости, представленные на рис. 2,*а* и 2,*б*, линейные, указывает на правильность учета параметров $H$ и $U$ в формуле (1). Зависимость, представленная на рис. 2,*в*, имеет отклонения от линейности для больших значений $M$. Эти отклонения легко могут быть объяснены тем, что для таких величин $M$ волокна на нижнем электроде в процессе работы устройства располагаются уже не в один слой, как это предполагалось в расчете, а в два и более. То есть в этом случае зарядка волокон, участвующих в движении, происходит уже не с поверхности электрода, а через слой волокон, расположенных под ними. Это и наблюдается визуально. В этом случае величина сил «зеркального изображения», удерживающих волокна на электроде и определяющих величину избыточного заряда на волокне при его отрыве от электрода [6], уменьшается. В свете модели [10] это должно приводить к уменьшению величины тока, протекающего через горизонтальные электроды, что и наблюдается экспериментально (рис. 2,*в*).

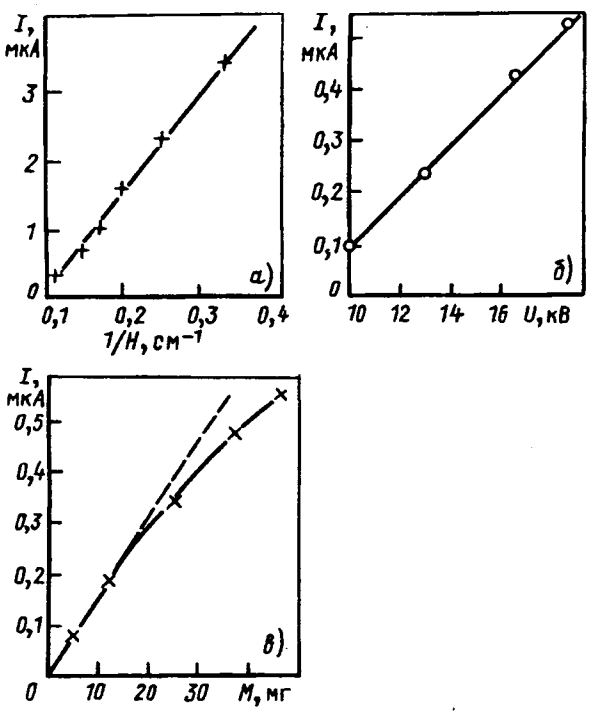



**Рис. 2.** Зависимости $I(1/H)$ (*а*), $I(U)$ (*б*) и $I(M)$ (*в*)

На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость величины тока, измеренного этим устройством при постоянных значениях параметров $H$, $M$, $U$ для различных образцов ворса одной геометрии, от величины его «сопротивления», измеренного по методу [1] с помощью датчика фирмы Maag Flockmaschinen. Вначале образец ворса массой 3 г измерялся по методу [1] (измерения проводились по стандартной методике в заводской лаборатории на предприятии АООТ «Икофлок» (Санкт-Петербург), потом из этого же ворса приготовлялись 19 образцов массой 16 мг, на которых проводились измерения по обсуждаемому методу. Среднеарифметическое значение тока откладывалось по оси ординат, а логарифм измеренного по методу [1] значения «сопротивления» ворса по оси абсцисс.

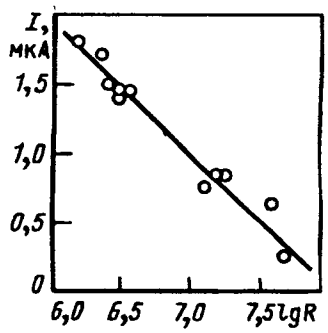



**Рис. 3.** Зависимость $I(\lg R)$

Корреляционный анализ полученных данных показывает, что зависимость, представленная на рис. 3, хорошо аппроксимируется формулой

$$I = a \lg R + b, \qquad (2)$$

где $a = 7{,}589$ мкА; $b = -0{,}9441$ мкА (коэффициент корреляции 0,974). Статистическая ошибка из-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

мерений по обсуждаемому методу на устройстве рис. 1,*в* для образцов одного ворса не превышала 5%.

В настоящее время практически завершена работа по созданию действующего устройства для контроля электрических свойств любых квазидиэлектрических порошков по рассмотренному методу, в котором установка необходимых величин $H$ и $U$ производится автоматически. Контроль за этими параметрами производится по цифровому табло. В устройстве предусмотрено автоматическое измерение максимального значения величины тока и соответствующего значения $R$. Расчет $R$ производится по формуле (2). Предусмотрено автоматическое измерение времени установления максимального значения силы тока, которое также выводится на цифровое табло.

Устройство компактно ($25 \times 40 \times 45$ см$^3$) и легко может быть модифицировано в связи с конкретными запросами заказчика.

**Выводы.** 1. Разработан новый метод контроля проводящих свойств квазидиэлектрических порошковых материалов. Способ позволяет проводить объективный контроль в условиях, адекватных условиям, в которых эти свойства используются при нанесении покрытий из этих материалов с помощью сильных электрических полей.

2. Для реализации метода разработано многофункциональное устройство, позволяющее проводить не только количественный контроль величины, непосредственно связанной с проводимостью отдельной частицы при ее контактной зарядке на электроде, но и использовать его для определения оптимальных технологических параметров оборудования для нанесения покрытий из этих частиц методом электрофлокирования. Минимальное количество требуемого для проведения качественных измерений исследуемого материала в одной пробе в 200 раз меньше, чем при работе по общепринятой у нас и за рубежом методике, статистический разброс при повторных измерениях на одном материале незначителен.

3. Приведено экспериментальное обоснование теоретической модели метода, развитой ранее, и получено подтверждение основных ее положений.

4. Найдена зависимость между величиной измеряемого в предложенном методе тока и величиной «сопротивления» материала, измеренного общепринятым методом при сравнительных измерениях на одних образцах вискозного ворса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Maag** Flockmaschinen GmbH. — Flock, 1992, № 68.
2. **Семенов В.А.** Теория и практика электрофлокирования. М.: Изд-во ВЗПИ, 1992.
3. **Бершев Е.Н.** Физические основы технологии электрофлокирования. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1984.
4. **Патент 1350621 РФ.** Способ измерения проводимости однородных частиц / П.Г. Шляхтенко.
5. **Шляхтенко П.Г., Бершев Е.Н., Фирсов Е.И.** О движении заряженных волокон в неоднородном электрическом поле. — Электрическая обработка материалов, 1984, № 6.
6. **Шляхтенко П.Г., Мещерякова Г.П.** Движение заряженных волокон в неоднородном электрическом поле. — Электричество, 1991, № 2.
7. **Попков В.И., Глазов М.И.** Кинетика зарядки и динамики волокон в электрическом поле. — М.: Наука, 1976.
8. **Патент 1616340 РФ.** Способ контроля проводимости однородных частиц, используемых для нанесения покрытий в электрическом поле / П.Г. Шляхтенко.
9. **Патент 182072Г РФ.** Устройство для контроля качества однородных частиц, используемых для нанесения покрытий в электрическом поле / П.Г. Шляхтенко.
10. **Шляхтенко П.Г.** Способ контроля электрических свойств квазидиэлектрических порошковых структур. — Электрическая обработка материалов, 1993, № 6.

*[14.04.95]*

*Автор:* ***Шляхтенко Павел Григорьевич*** *окончил физический факультет Ленинградского государственного университета в 1963 г. В 1994 г. защитил докторскую диссертацию по теме «новые методы неразрушающего контроля основных параметров волокносодержащих материалов». Профессор кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна.*

***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**).

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# О достоверности оценки надежности электрической изоляции установок электроцентробежных насосов

МЕСЕНЖНИК Я.З., ТАРЕЕВ Б.М., ПРУТ Л.Я.

*На больших информационных массивах проведен анализ отказов систем электрической изоляции (СЭИ) погружных установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) в ряде нефтедобывающих управлений Западной Сибири. Показано, в частности, что как параметры законов распределения отказов (ЗРО) СЭИ, так и сами законы могут различаться для разных типов УЭЦН, а также изменяться в течение эксплуатации последних. Нормальное распределение отказов не установлено ни в одном случае. Превалируют логнормальные распределения, иногда имеют место γ-распределение и распределение Эрланга. Законы распределения отказов СЭИ при различных системах гидрозащиты — логнормальные с различающимися параметрами.*

Ключевые слова: *электроцентробежные погружные нефтенасосы, системы электрической изоляции, отказы, распределения, гидрозащита, погружные электродвигатели*

*In large informative arrays an analysis is made of electrical insulation systems (EIS) failures in submersible electrically driven centrifugal oil pump installations (ECPI) in a number of oil extracting departments of Western Siberia. It is shown along other things, that parameters of laws of failures distribution in EIS as well as the laws themselves may differ in different types of ECPI and change in the time of the lasts exploitation. The normal distribution of failures is not found in any case. There prevail the log-normal distribution, sometimes there take place γ-distribution and Erlrang's distribution. The law of failures distribution of EIS of ECPIs with different types of water proof coating is log-normal with differential parameters.*

Key words: *electrically driven centrifugal submersible oil pump, electric insulation systems, failures distributions, water proof coating, submersible electric motors*

Достаточно достоверная оценка эксплуатационной надежности электрической изоляции установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) (статорная обмотка погружного электродвигателя и кабель) должна и может базироваться на обработке только весьма больших информационных массивов [1—3 и др.]

Рассмотрим это положение на примере промыслов Западной Сибири. Здесь только в АО «Нижневартовскнефтегаз», «Сургутнефтегаз», «Юганскнефтегаз» эксплуатируются одновременно более 20 тыс. УЭЦН производства заводов стран СНГ, наработка до отказа которых обычно не превышает 300—400 сут.

Расчету надежности обычно предшествует выбор методов оценки. Для определения показателей надежности используются как параметрические, так и непараметрические методы. Первые дают более точную оценку, но при их использовании вид функции распределения отказов должен оставаться постоянным, а параметры этой функции не должны существенно меняться. Это условие, как будет показано ниже, не всегда выполняется на практике.

С целью выбора методов расчета надежности, а также оценки надежности электрической изоляции УЭЦН и их элементов на ЭВМ исследовались с использованием ППП «Статграфик» данные эксплуатации УЭЦН в Западно-Сибирском нефтяном регионе. Анализ отказов электрической изоляции УЭЦН-50, эксплуатировавшихся в нефтегазодобывающем управлении (НГДУ) «Сургутнефть», «Быстринскнефть», «Федоровскнефть», «Лянторнефть», АО «Сургутнефтегаз», показал изменение как параметров, так и, в некоторых случаях, вида законов распределения отказов по годам (табл. 1) и маркам УЭЦН (табл. 2).

*Таблица 1*

**Изменение параметров и законов распределения отказов кабелей по годам**

| НГДУ | Год отказа УЭЦН-50 | Закон распределения отказов | Параметры закона распределения отказов |
|---|---|---|---|
| «Сургутнефть» | 1989 | логнормальный | $a=213$; $\sigma=145$ |
| | 1990 | логнормальный | $a=262$; $\sigma=211$ |
| | 1991 | не определен | — |
| | 1992 | логнормальный | $a=334$; $\sigma=288$ |
| «Федоровскнефть» | 1989 | логнормальный | $a=196$; $\sigma=118$ |
| | 1990 | логнормальный | $a=253$; $\sigma=187$ |
| | 1991 | логнормальный | $a=262$; $\sigma=196$ |
| | 1992 | не определен | — |
| | 1993 | логнормальный | $a=251$; $\sigma=198$ |
| «Быстринскнефть» | 1989 | логнормальный | $a=195$; $\sigma=124$ |
| | 1990 | логнормальный | $a=231$; $\sigma=187$ |
| | 1991 | логнормальный | $a=255$; $\sigma=191$ |
| | 1992 | логнормальный | $a=349$; $\sigma=310$ |
| | 1993 | Эрланга | $\alpha=2$; $\beta=6{,}47289E\text{-}3$ |
| | 1994 | Эрланга | $\alpha=2$; $\beta=7{,}14985E\text{-}3$ |
| «Лянторнефть» | 1989 | не определен | — |
| | 1990 | Эрланга | $\alpha=2$; $\beta=7{,}22513E\text{-}3$ |
| | 1991 | не определен | — |
| | 1992 | гамма-распределение | $\alpha=2{,}8446$; $\beta=7{,}62178E\text{-}3$ |

В гамма-распределении значению параметра на ЭВМ соответствует определенное число. Например, $\beta=6{,}47289E\text{-}3$ в кодах на ЭВМ соответствует число 0,00647289.

Функции плотности вероятности $P(x)$ имеют следующий вид [9]:

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

*Таблица 2*

**Изменение параметров и вида законов распределения отказов кабелей по маркам УЭЦН**

| Марка УЭЦН | Закон распределения отказов | Параметры закона распределения отказов |
|---|---|---|
| УЭЦН-40 | Эрланга | $\alpha=2$; $\beta=5{,}9162E\text{-}3$ |
| УЭЦН-50 | логнормальный | $a=263$; $\sigma=187$ |
| УЭЦН-80 | не определен | — |
| УЭЦН-125, 130 | гамма-распределение | $\alpha=2{,}51$; $\beta=7{,}13756E\text{-}3$ |
| УЭЦН-250 | Эрланга | $\alpha=2$; $\beta=5{,}23353E\text{-}3$ |

а) для логнормального распределения

$$P(x)=\frac{1}{X\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln x-a)^2\right], \qquad (1)$$

б) для гамма-распределения

$$P(x)=\frac{1}{\Gamma(\alpha+1)\beta^{\alpha+1}}x^{\alpha}\exp\left(-\frac{x}{\beta}\right), \qquad (2)$$

где Г — гамма-функция,

в) для распределения Эрланга

$$P(x)=\frac{1}{\beta^{\alpha}(\alpha-1)!}x^{\alpha-1}\exp\left(-\frac{x}{\beta}\right). \qquad (3)$$

Невозможность определения закона распределения отказов может свидетельствовать о смешанной выборке вследствие наличия различных механизмов отказов УЭЦН.

При исследовании надежности как самих УЭЦН, так и их элементов — погружного электродвигателя (ПЭД) и кабелей — рассматривались только отказы, при которых наработка превышала 60 сут. Это позволила исключить отказы, связанные с так называемыми грубыми дефектами (повреждение изоляции кабеля при спуске в скважину, негерметичность ПЭД, некачественный вывод на режим и т. д.). Различия в законах распределения отказов для УЭЦН различных типов могут быть связаны как с особенностями их эксплуатации в нефтяных скважинах, так и с различиями в конструкциях самих УЭЦН. Так, УЭЦН-40 и УЭЦН-50 эксплуатируются в малодебетных скважинах, где велика вероятность чреватого негативными последствиями срыва подачи откачиваемой скважинной жидкости, но эти типы УЭЦН отличаются по конструкции. В УЭЦН-40 используется гидрозащита типа 1Г-51, а в УЭЦН — гидрозащита типов П-92, П-92Д, 1Г-51. Вероятность срыва подачи в высокодебетных скважинах, где эксплуатируются УЭЦН-80, УЭЦН-125, УЭЦН-130, УЭЦН-250, весьма мала.

Можно предположить, что различия законов распределения отказов этих УЭЦН связаны в основном с конструктивными отличиями используемых в них ПЭД. Так, в УЭЦН-250 используется двухсекционный ПЭД-90, а в УЭЦН-125, УЭЦН-130 — односекционный ПЭД-45. Необходимо отметить, что в высокодебетных скважинах с ростом производительности УЭЦН начинает также возрастать вероятность срыва подачи. Это может влиять на изменение как параметров, так и закона распределения отказов.

Анализ отказов УЭЦН-50, эксплуатировавшихся в 1989—1992 гг. в НГДУ «Сургутнефть», «Быстринскнефть», «Федоровскнефть», показал (табл.1) совпадение законов распределения отказов по годам. В этих НГДУ геолого-технические характеристики скважин достаточно близки и механизмы отказов УЭЦН-50 в основном совпадают. В то же время для НГДУ «Лянторнефть» законы распределения отказов УЭЦН-50 отличаются от таких законов в других НГДУ АО «Сургутнефтегаз». Это может быть связано с тем, что на месторождениях этого НГДУ газовый фактор составляет 200—250 м$^3$/т, в то время как на месторождениях других НГДУ АО «Сургутнефтегаз» — 50÷60 м$^3$/т. Повышение содержания свободного газа в месте подвески УЭЦН в скважинах НГДУ «Лянторфнефть» увеличивает вероятность срыва подачи откачиваемой пластовой жидкости, что вносит изменения в механизм отказов изоляции УЭЦН.

С целью выяснения типа гидрозащиты на надежность изоляции УЭЦН анализировались данные эксплуатации за 1987—1994 гг. УЭЦН-50 с различными типами гидрозащиты в НГДУ «Быстринскнефть» и «Федоровскнефть» (табл. 3).

*Таблица 3*

**Влияние типа гидрозащиты на закон и параметры распределения отказов**

| НГДУ | Тип гидрозащиты | Закон распределения отказов | Параметры закона распределения |
|---|---|---|---|
| «Федоровскнефть» | П-92Д | логнормальный | $a=206$; $\sigma=130$ |
| | П-92 | логнормальный | $a=261$; $\sigma=188$ |
| | 1Г-51 | логнормальный | $a=283$; $\sigma=238$ |
| «Быстринскнефть» | П-92Д | логнормальный | $a=218$; $\sigma=175$ |
| | П-92 | логнормальный | $a=276$; $\sigma=230$ |
| | 1Г-51 | логнормальный | $a=271$; $\sigma=219$ |

Значимость в отличии наработки изоляции УЭЦН определялась на уровне 0,05 с использованием непараметрического критерия Уилкоксона. Установлено отсутствие значимости в отличии наработки УЭЦН-50 с гидрозащитой типов 1Г-51 и П-92. В то же время значимо отличие в наработке УЭЦН-50 с гидрозащитой типов П-92Д, П-92, а также 1Г-51 и Р-92Д.

Как следует из табл. 3, отказы УЭЦН с различными типами гидрозащиты имеют логнор-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

мальный закон распределения с различающими параметрами. При эксплуатации УЭЦН одной марки с различными типами гидрозащиты закон распределения отказов может отличаться от логнормального, так как только при суммировании нескольких распределений с нормальным или пуассоновским законами распределения вид закона распределения не изменяется. Можно предположить, что изменение закона распределения отказов УЭЦН-50, эксплуатирующихся в НГДУ «Быстринскнефть» после 1992 г. (табл. 1), с логнормального на закон Эрланга связано с заменой в это время гидрозащиты П-92 на П-92Д. Законы распределения отказов ПЭД, эксплуатировавшихся в 1984—1987 гг. в ПО «Нижневартовскнефтегаз», приведены в табл. 4.

*Таблица 4*

**Законы распределения отказов в ПЭД по ПО «Нижневартовскнефтегаз»**

| Марка ПЭД | Закон распределения отказов | Параметры закона распределения отказов |
|---|---|---|
| ПЭД-32 | логнормальный | $a=293$; $\sigma=207$ |
| ПЭД-45 | гамма-распределение | $\alpha=2{,}87925$; $\beta=8{,}97608E\text{-}3$ |
| ПЭД-63 | логнормальный | $a=329$; $\sigma=233$ |
| ПЭД-90 | гамма-распределение | $\alpha=2{,}79864$; $\beta=9{,}08689E\text{-}3$ |

Отказы изоляции статорной обмотки ПЭД связаны в основном с разгерметизацией ПЭД из-за низкого качества гидрозащиты, а также срыва подачи откачиваемой пластовой жидкости. Различие в законах распределения отказов различных марок ПЭД может быть связано с различными как в дебете скважин, так и в типе гидрозащиты.

В [4] рассматривалась надежность плоского кабеля марки КПБП и круглого кабеля марки КПБК с изоляцией из полиэтилена высокой плотности, эксплуатировавшихся в 1984—1987 гг. в ПО «Нижневартовскнефтегаз». Было показано, что отличие наработок кабелей КПБП и КПБК (рассматривалась надежность основных длин кабельных линий) значимо. Наработка до отказа кабелей КПБП составляла 200 сут, а КПБК — 300 сут. Можно предположить, что различие наработок этих марок кабелей связано как с большей повреждаемостью плоских кабелей при подъеме, так и с затяжкой металлической брони при бронировании плоского кабеля КПБП. Это приводит к сдавливанию изоляционной оболочки кабеля. Так как температурный коэффициент объема у полиэтилена на два порядка выше, чем у металла, то при эксплуатации кабеля КПБП в нефтяных скважинах в изоляции возникают значительные механические напряжения (особенно в изоляции средней жилы), что приводит к отказам кабеля.

В то же время исследования надежности кабелей КПБП и КПБК, эксплуатировавшихся в 1993—1995 гг. в АО «Сургутнефтегаз», где геолого-технические характеристики скважин, аналогичных скважинах ПО «Нижневартовскнефтегаз», выявили отсутствие значимости в отличии наработки кабелей КПБП и КПБК. Наработка кабеля КПБП составила 391 сут, а кабеля КПБК — 393 сут.

Таким образом, зафиксировано как значительное увеличение по сравнению с данными за 1984—1987 гг. надежности кабелей КПБК и КПБП, так и практически отсутствие различия в надежности между этими марками кабелей. Если последнее можно объяснить улучшением качества бронирования кабелей КПБП — исключением перетяжки брони путем перехода к «противозадирному» профилю брони, то причины существенного роста наработки обеих марок кабелей не столь очевидны (хотелось бы надеяться, что рост наработки связан с повышением как качества кабеля, так и культуры его эксплуатации) и требуются дополнительные исследования.

Законы распределения отказов кабелей КПБП и КПБК, эксплуатировавшихся в периоды 1984—1987 гг. и 1993—1995 гг., а также югославского кабеля (период эксплуатации 1993—1995 гг.), конструкция которого аналогична кабелю КПБК, не установлены. В то же время отказы изоляции ПЭД подчиняются определенным законам распределения (табл. 4). Сложности с определением законов распределения отказов этих марок кабелей связаны с наличием различных механизмов отказов кабелей. Так, отказы могут происходить как по причине разрушения изоляции из-за значительных механических напряжений в ней, так и из-за термобаричного старения изоляции при эксплуатации кабелей в скважинах. Основные магистральные длины кабельных линий могут состоять из нескольких отрезков кабелей, имеющих различную предварительную наработку в скважинах, что также вносит искажения в оценку надежности кабелей.

Исследования также показали отсутствие значимости в отличии наработки кабелей КПБК и югославских кабелей аналогичной конструкции. Можно предположить, что надежность этих кабелей определяется в основном не особенностями технологии их изготовления на различных кабельных заводах, а физическими свойствами изоляции. Так, отличия наработок кабелей выпуска заводов «Роскабель» и «Подольсккабель», эксплуатировавшихся в 1994—1995 гг., незначимы.

Исследования показали, что основной причиной изменения закона распределения отказов какой-либо марки УЭЦН, например УЭЦН-50, является изменение конструкции гидрозащиты. Группируя эти УЭЦН по типам гидрозащиты, можно получить закон распределения отказов, не

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

меняющийся со временем, и использовать параметрические методы оценки надежности. Можно предположить, что в этом случае параметры закона распределения отказов УЭЦН также не меняются существенно со временем, так как такие свойства скважин, как обводненность, дебет, концентрация мехпримесей и т. д., влияющие на надежность УЭЦН, за время эксплуатации УЭЦН изменяются, как правило, незначительно. Отмечаемое в табл. 1 изменение со временем параметров закона распределения отказов в эксплуатации УЭЦН-50 связано с изменением за это время количества УЭЦН-50 с тем или иным типом гидрозащиты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Месенжник Я.З., Бабушкин Л.И., Еремеев Г.В.** Эксплуатационная надежность кабелей для нефтедобычи. — Кабельная техника, 1969, № 59—60.

2. **Месенжник Я.З.** Кабели для нефтегазовой промышленности. — Ташкент: ФАН, 1972.

3. **Месенжник Я.З., Осягин А.А.** Силовые кабельные линии для погружных электросистем. — М.: Энергоатомиздат, 1987.

4. **Свалов Г.Г., Григорьян А.Г., Месенжник Я.З., Прут Л.Я.** Надежность кабелей для нефтедобычи в условиях Западно-Сибирского нефтедобывающего региона. — Электротехническое производство, М., 1988, № 12.

5. **Месенжник Я.З., Осягин А.А.** Системные исследования муфт силовых кабельных линий для нефтенасосов. — Электричество, 1989, № 5.

6. **Месенжник Я.З., Прут Л.Я.** Эксплуатационная надежность в условиях Западной Сибири электроцентробежных насосов для добычи нефти. — Электротехника, 1994, № 8.

7. **Месенжник Я.З., Тареев Б.М., Прут Л.Я.** Физико-математические модели отказов изоляции погружных установок электроцентробежных насосов. — Электричество, 1995, № 1.

8. **Месенжник Я.З., Тареев Б.М., Прут Л.Я.** К расчету надежности электрической изоляции погружных электроцентробежных насосов. — Электричество, 1995, № 12.

9. **Джонсон Н., Лион Д.** Статистика и планирование эксперимента в науке и технике. — М.: Мир, 1980.

*[25.11.05]*

*Авторы: **Месенжник Яков Захарович** окончил в 1958 г. Среднеазиатский политехнический институт. В 1984 г. во Всесоюзном (ныне Всероссийском) научно-исследовательском институте кабельной промышленности (ВНИИКП) защитил докторскую диссертацию по теме «Теория, методы комплексного расчета, конструирования и прогнозирования работоспособности кабелей для нефтегазовой промышленности в условиях многофакторного воздействия». Заведующий лабораторией кабелей для погружных электрических систем ВНИИКП.*

***Тареев Борис Михайлович** окончил в 1929 г. электротехнический факультет Московского высшего технического училища им. Н.Э. Баумана. В 1948 г. в Московском энергетическом институте защитил докторскую диссертацию по теме «Нагревостойкая электрическая изоляция». Главный редактор отдела электротехники и энергетики Всероссийского института научной и технической информации.*

***Прут Леонид Яковлевич** окончил в 1963 г. Ташкентский государственный университет. В 1992 г. в Томском политехническом институте защитил кандидатскую диссертацию по теме, связанной с исследованием электрофизических характеристик, надежности и долговечности кабелей и проводов для нефтегазовой промышленности. Ведет научную работу в Сургутском государственном университете.*

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# О дешифраторном методе анализа электрических цепей

ПЯТИН Ю.М.

*Предложен дешифраторный метод, основанный на неизвестном ранее факте наличия у квадратной матрицы ключа, позволяющего записывать выражения искомых неизвестных сразу в законченном виде, свободном от запрещенных членов. Это достигается расстановкой в формуле ключа матрицы символов гамма-оператора. Метод применим к любым объектам, описываемым системой линейных уравнений.*

Ключевые слова: *линейная цепь, ключ матрицы, гамма-оператор*

*Proposed the decoder method based on unknown previously fact presence near square matrix the key permitting write expressions unknown quantities at once in completed form free from prohibited terms. This achieved arrangement in formula matrix key symbols gamma-operator. The method since he applicable to any object described system linear equations.*

Key words: *linear circuit, matrix key, gamma-operator*

**Общие положения.** Система уравнений, описывающая электрическую цепь, имеет вид алгебраической разности независимо от того, каким методом (контурных токов или узловых напряжений) она составлена:

$$\left.\begin{array}{l} +X_1 a_{11} - X_2 a_{12} - \ldots - X_n a_{1n} = b_1; \\ -X_1 a_{21} + X_2 a_{22} - \ldots - X_n a_{2n} = b_2; \\ - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - \\ -X_1 a_{n1} - X_2 a_{n2} - \ldots + X_n a_{nn} = b_n; \end{array}\right\} \quad (1)$$

где $a_{\alpha\alpha} = a_{\alpha 0} + a_{\alpha 1} + a_{\alpha 2} + \ldots + a_{\alpha n}$.

Искомые неизвестные (корни системы) выражаются здесь формулой Крамера $X_\alpha = D_\alpha / D_n$, имеющей вид отношения определителей, которые для получения формулы вычисления необходимо разложить на суммы членов. В процессе разложения возникает много заведомо сокращающихся членов, называемых запрещенными. При наличии запрещенных членов формула Крамера пригодна только для вычисления корней при заданных значениях параметров объекта и совершенно непригодна для анализа его свойств, например для оптимизации значений его параметров. О степени трудоемкости освобождения формулы Крамера от запрещенных членов судить по их количеству в определителе системы $D_n$, стоящем в знаменателе. Числа разрешенных и запрещенных членов выражаются здесь формулами

$$N_{\text{разр}} = (n+1)^{(n-1)}; \quad N_{\text{запр}} = 2\,[n^n - (n+1)^{(n-1)}], \quad (2)$$

где $n$ — число уравнений.

В зависимости от порядка системы уравнений числа запрещенных и разрешенных членов образуют ряд:

| $n=$ | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|
| $N_{\text{запр}}=$ | 2 | 22 | 262 | 3658 | 59698 |
| $N_{\text{разр}}=$ | 3 | 16 | 125 | 1256 | 16807 |

свидетельствующий о чрезвычайной трудоемкости нахождения взаимно сокращающихся пар запрещенных членов.

Поэтому отыскание способа освобождения корней системы уравнений от запрещенных членов является одной из фундаментальных проблем. Применение ключа матрицы радикально решает эту проблему, так как формулы корней системы уравнений, записанные с помощью ключа матрицы, **изначально свободны от запрещенных членов**.

**Ключи матрицы.** Определитель $D_n$ и первый (основной) ключ матрицы $K_{1n}$ выражаются формулами

$$D_n = a_{11} \cdot a_{22} \cdot a_{33} \cdot \ldots \cdot a_{nn} - \Sigma; \quad (3)$$

$$K_{1n} = (a_{22} - a_{20})(a_{33} - a_{30}) \ldots (a_{nn} - a_{n0}) - \Sigma_1, \quad (4)$$

где $\Sigma$ и $\Sigma_1$ — суммы запрещенных членов.

Из сопоставления выражений (3) и (4) следует, что ключ $K_{1n}$ имеет такую же структуру, как и определитель $D_{(n-1)}$, порядок которого на единицу меньше. Поэтому ключ $K_{1n}$ может быть выражен формулой разложения определителя $D_{(n-1)}$, в которой все индексы увеличены на единицу.

Чтобы ключ $K_{1n}$ изначально был свободен от запрещенных членов, необходимо и достаточно заранее освободить от них определитель $D_{(n-1)}$. Для нахождения изначально свободного от запрещенных членов ключа следующего порядка $K_{1(n+1)}$ достаточно найти с помощью ключа $K_{1n}$ определитель $D_n$ и увеличить на единицу все его индексы. Начинать таблицу основных ключей следует с определителя второго порядка, имеющего лишь одну пару запрещенных членов.

*Таблица основных ключей.* Для придания формулам ключей необходимой компактности здесь принята запись в индексах: $a_{\alpha\beta} \Rightarrow \alpha\beta$, тогда

$K_{12} = 21$

$K_{13} = 21\,(31+32) + 31 \cdot 23$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$K_{14}=21[(31+32)(41+42+43)+34(41+42)]+31[23\times$
$\times(41+42+43)+24\cdot 43]+41[24(31+32+34)+23\cdot 34]$
$K_{15} = 21B_{15} + 31B_{25} + 41B_{35} + 51B_{45}$,
где
$B_{15}=(31+32)[(41+42+43)(51+52+53+54)+45(51+$
$+52+53)]+(41+42)[34(51+52+53+54)+35\cdot 54]+$
$+(51+52)[35(41+42+43+45)+34\cdot 45]$
$B_{25}=23[(41+42+43)(51+52+53+54)+45(51+52+$
$+53)]+43[24(51+52+53+54)+25\cdot 54]+53[25(41+$
$+42+43+45)+24\cdot 45]$
$B_{35}=34[(23+24)(51+52+53+54)+25(53+54)]+24\times$
$\times[(31+32)(51+52+53+54)+35(51+52)]+54[35\times$
$\times(23+24+25)+25(31+32)]$
$B_{45}=35[(23+25)(41+42+43+45)+24(43+45)]+45\times$
$\times[34(23+24+25)+24(31+32)]+25[(31+32)(41+42+$
$+43+45)+34(41+42)]$.

В большинстве случаев объекты инженерного проектирования описываются системами уравнений не выше пятого порядка. Если же потребуется найти ключи $K_{16}$, $K_{17}$ и т. д., то их получают последовательно, взяв за основу ключ $K_{15}$. Найдя с его помощью определитель $D_5$ и увеличив на единицу все его индексы, получают выражение ключа $K_{16}$. Затем, приняв за основу ключ $K_{16}$, находят определитель $D_6$ и, увеличив на единицу все его индексы, получают выражение ключа $K_{17}$ и так далее.

*Получение дополнительных ключей.* У системы из $n$ уравнений имеется $n$ ключей. Дополнительные ключи $K_{\alpha n}$ получают из основного $K_{1n}$ путем замены в нем индекса $\alpha$ на 1 и индекса 1 на $\alpha$.

**Решение системы уравнений с помощью дешифраторного ключа.** Дешифраторный ключ является сочетанием ключа матрицы с гамма-оператором. Он позволяет сразу записывать выражения искомых неизвестных в законченном виде, свободном от запрещенных членов, путем одной лишь расстановки в формуле ключа матрицы символов гамма-оператора.

Выражение искомого неизвестного имеет здесь вид

$$X_\alpha=(b_1A_{1\alpha} + b_2A_{2\alpha} +\ldots+b_nA_{n\alpha})/$$
$$/(a_{10}A_{11} + a_{20}A_{21} +\ldots+a_{n0}A_{n1}), \qquad (5)$$

где $A$ — алгебраические дополнения (адъюнкты) определителя системы, число которых $n^2$; любую из адъюнкт $A_{\alpha\beta}$ находят из формулы ключа $K_{\alpha n}$, первый индекс которого равен первому индексу искомой адъюнкты.

Каждый ключ обслуживает $n$ адъюнкт с одинаковым первым индексом. Поэтому алгебраические выражения всех адъюнкт у каждой группы одинаковы и различаются только местами расстановки символов $\gamma$, которые ставятся над тем коэффициентом $a_{\alpha\beta}$, у которого второй индекс равен второму индексу искомой адъюнкты. Простановка символа оператора означает, что $\overset{\gamma}{a}_{\alpha\beta}=a_{\alpha\beta}+a_{\alpha 0}$.

У взаимных цепей $a_{\alpha\beta}\equiv a_{\beta\alpha}$. Поэтому здесь

$$A_{\alpha\beta}\equiv A_{\beta\alpha}. \qquad (6)$$

Если источник питания один, то $b_2=b_3=\ldots=b_n=0$ и формула (5) принимает вид

$$X_\alpha = \frac{b_1A_{1\alpha}}{a_{10}A_{11} + a_{20}A_{21} + \ldots + a_{n0}A_{n1}}. \qquad (7)$$

Адъюнкты $A_{1\alpha}$ всех числителей записывают здесь с помощью основного ключа $K_{1n}$, а все адъюнкты знаменателя находят по формуле (6).

**Примеры применения дешифраторного метода.**

*Пример 1.* Нахождение выражения конкретной адъюнкты. Пусть требуется найти выражение адъюнкты $A_{23}$ системы уравнений пятого порядка. Первый индекс этой адъюнкты 2, а второй — 3. Поэтому в ключе $K_{15}$ нужно при его переписывании заменить индексы 2 на 1 и индексы 1 на 2, а символы гамма-оператора ставить над теми коэффициентами $a_{\alpha\beta}$, у которых второй индекс 3. Отсюда сразу получают:

$A_{23} = 12\overset{\gamma}{B}_1 + 32\overset{\gamma}{B}_2 + 42\overset{\gamma}{B}_3 + 52\overset{\gamma}{B}_4$,
где
$\overset{\gamma}{B}_1=(31+32)[(41+42+\overset{\gamma}{43})(51+52+\overset{\gamma}{53}+54)+45(51+$
$+52+\overset{\gamma}{53})]+(41+42)[34(51+52+\overset{\gamma}{53}+54)+35\cdot 54]+$
$+(51+52)[35(41+42+\overset{\gamma}{43}+45)+34\cdot 45]$
$\overset{\gamma}{B}_2=\overset{\gamma}{13}[(41+42+\overset{\gamma}{43})(51+52+\overset{\gamma}{53}+54)+45(51+52+$
$+53)]+\overset{\gamma}{43}[14(51+52+\overset{\gamma}{53}+54)+15\cdot 54]+\overset{\gamma}{53}[15(41+$
$+42+\overset{\gamma}{43}+45)+14\cdot 45]$
$\overset{\gamma}{B}_3=34[(\overset{\gamma}{13}+14)(51+52+\overset{\gamma}{53}+54)+15(\overset{\gamma}{53}+54)]+14\times$
$\times[(31+32)(51+52+\overset{\gamma}{53}+54)+35(51+52)]+54[35\times$
$\times(\overset{\gamma}{13}+14+15)+15(31+32)]$
$\overset{\gamma}{B}_4=35[(\overset{\gamma}{13}+15)(41+42+\overset{\gamma}{43}+45)+14(\overset{\gamma}{43}+45)]+45\times$
$\times[34(\overset{\gamma}{13}+14+15)+14(31+32)]+15[(31+32)(41+42+$
$+\overset{\gamma}{43}+45)+34(41+42)]$.

Такое алгебраическое выражение имеют остальные четыре адъюнкты: $A_{21}$, $A_{22}$, $A_{24}$ и $A_{25}$, у которых первый индекс 2. Они отличаются от $A_{23}$ только местами простановки гамма-оператора.

*Пример 2.* Запись решения системы уравнений. Пусть требуется записать решение системы уравнений третьего порядка. Общая формула (5) кор-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ней имеет здесь вид

$$X_\alpha = (b_1 A_{1\alpha} + b_2 A_{2\alpha} + b_3 A_{3\alpha}) / \\ / (a_{10} A_{11} + a_{20} A_{21} + a_{30} A_{31}).$$

Общее число адъюнкт $n^2 = 9$. Общее число ключей $n = 3$. Выражение основного ключа третьего порядка $K_{13}$ берут из таблицы, а дополнительные ключи $K_{23}$ и $K_{33}$ получают из $K_{13}$ путем замены индексов. Запись ключей и искомых адъюнкт рекомендуется проводить в индексах: $a_{\alpha\beta} \Rightarrow \alpha\beta$. Отсюда

$$K_{13} = 21\,(31+32) + 31 \cdot 23;$$

$$K_{23} = 12\,(32+31) + 32 \cdot 13;$$

$$K_{33} = 23\,(13+12) + 13 \cdot 21.$$

Ключ $K_{13}$ обслуживает группу адъюнкт, первый индекс которых 1; ключ $K_{23}$ — группу $A_{21}$, $A_{22}$, $A_{23}$; ключ $K_{33}$ — группу $A_{31}$, $A_{32}$, $A_{33}$. Во всех группах адъюнкт символ $\gamma$ ставится над тем коэффициентом $a_{\alpha\beta}$, второй индекс которого равен второму индексу данной адъюнкты. Простановка символа $\gamma$ означает, что $\overset{\gamma}{a}_{\alpha\beta} = a_{\alpha\beta} + a_{\alpha 0}$. Отсюда получаем выражения всех искомых адъюнкт:

| | | |
|---|---|---|
| $A_{11} = \overset{\gamma}{21}(\overset{\gamma}{31}+32) + \overset{\gamma}{31} \cdot 23$ | $A_{21} = \overset{\gamma}{12}(31+32) + 32 \cdot 13$ | $A_{31} = 23(12+13) + 13 \cdot \overset{\gamma}{21}$ |
| $A_{12} = 21(31+\overset{\gamma}{32}) + 31 \cdot \overset{\gamma}{23}$ | $A_{22} = \overset{\gamma}{12}(31+\overset{\gamma}{32}) + \overset{\gamma}{32} \cdot 13$ | $A_{32} = 23(\overset{\gamma}{12}+13) + 13 \cdot 21$ |
| $A_{13} = 21(31+32) + 31 \cdot \overset{\gamma}{23}$ | $A_{23} = 12(31+32) + 32 \cdot \overset{\gamma}{13}$ | $A_{33} = \overset{\gamma}{23}(12+\overset{\gamma}{13}) + \overset{\gamma}{13} \cdot 21$ |

**Выводы.** 1. Дешифраторные ключи позволяют получать выражения корней системы линейных уравнений без промежуточных выкладок. Это сводит к нулю трудоемкость решения уравнений. Однако основным достоинством ключей является изначальная свобода получаемых формул от запрещенных членов, т. е. заведомо сокращающихся пар одинаковых членов разного знака.

2. Если все параметры объекта, описываемого системой линейных уравнений, существенно положительны, то существенно положительны и выражения корней системы. Знак минус в знаменателе формулы Крамера свидетельствуют о том, что она содержит запрещенные члены. Это делает формулу непригодной для анализа свойств объекта, т. е. для его инженерного проектирования, и ограничивает ее применение только редким случаем, когда объект спроектирован, уже известны численные значения всех его параметров, но потребовалась дополнительная проверка.

3. Освобождение формулы Крамера от запрещенных членов практически возможно только у систем не выше четвертого порядка, где их уже 262.

*[11.09.95]*

*Автор:* ***Пятин Юрий Михайлович*** *окончил в 1932 г. электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ). В 1960 г. в ЛПИ защитил докторскую диссертацию по теме «Общая теория логометров». Профессор-консультант Московского автомобильно-дорожного института.*

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# О представлении трансформатора как четырехполюсника

ЛЫЧКИНА Г.П.

В последние годы в журнале «Электричество» публикуется много как теоретических, так и дискуссионных статей, посвященных выбору условно положительных направлений ЭДС, токов и напряжений на моделях трансформаторов. Эти статьи характеризуются большим разнообразием записей уравнений трансформаторов. Приверженность авторов учебников к различным формам записи уравнений без анализа адекватности этих форм, причин выбора той или иной формы записи существенно усложняет восприятие этого материала, особенно студентами, пользующимися различными учебниками.

По определению трансформатор — это электромагнитный статический преобразователь электрической энергии (рис. 1). На первичную обмотку трансформатора (зажимы $A$, $X$) подается напряжение $u_1$, которое в трансформаторе преобразуется в напряжение $u_2$, снимаемое со вторичных зажимов $a$, $x$. По отношению к сети первичная обмотка трансформатора представляет собой потребитель электрической энергии, а со стороны вторичных зажимов, к которым подключается потребитель (нагрузка), трансформатор является источником электрической энергии. Это и должно определять направление токов и напряжений. В целом же трансформатор является четырехполюсником и для анализа трансформаторов, построения их моделей следует использовать теорию четырехполюсников [1].

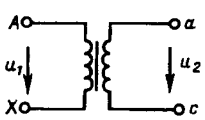



**Рис. 1.** Условное обозначение трансформатора

Показанные на рис. 2,*а* и *б* структурные схемы соответствуют проходным четырехполюсникам; схема 2,*а* — при подключении к сети первичной обмотки трансформатора, а рис. 2,*б* — при подаче преобразуемого напряжения на вторичную обмотку трансформатора. На рисунках указано и направление передачи мощности ($P_1$, $P_2$).

Подобно тому, как четырехполюсники могут быть активными и пассивными [1], то и трансформатор, если неизвестно направление передачи энергии, может быть представлен пассивным (рис. 2,*в*) или активным (рис. 2,*г*) четырехполюсником.

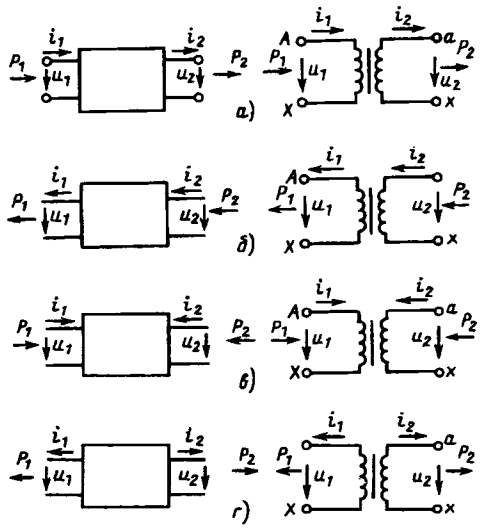



**Рис. 2.** Структурные схемы трансформатора, рассматриваемого как проходной четырехполюсник при подключении к сети первичной обмотки трансформатора (*а*) и при подключении к сети вторичной обмотки трансформатора (*б*), как пассивный (*в*) и как активный (*г*) четырехполюсник

При рассмотрении трансформаторов применим любой из вариантов четырехполюсников, рис. 2. Однако представление трансформатора активным четырехполюсником (рис. 2,*г*) практически не встречается в литературе и в статье [2] характеризуется как «произвольный метод» выбора направлений электрических величин. Предпочтение отдается проходному четырехполюснику (рис. 2,*а*), так как эта схема непосредственно следует из определения трансформатора. Эту схему представления трансформатора называют «рациональной».

Если не известно направление передачи энергии в трансформаторе, то возможен выбор условно-положительных направлений токов и напряжений, как в схеме рис. 2,*в*. Этот метод выбора направлений называют «традиционным».

Из шести возможных типов уравнений четырехполюсников [1] для математического описания процессов в трансформаторе используются уравнения типа $\underline{z}$; зависимость напряжений на входе и выходе $\dot{U}_1(\dot{I}_1, \dot{\Phi})$, $\dot{U}_2(\dot{I}_2, \dot{\Phi})$ в функции соответствующих токов и потока $\dot{\Phi}$ или ЭДС $\dot{E}_1$, $\dot{E}_2$, индуцируемых в первичной и вторичной обмотках трансформатора. Здесь существенен выбор условно положительного направления индуцируемых ЭДС [3—5]. По закону электромагнитной индукции

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$e_{инд} = -d\psi/dt$$

и условно положительное направление $e_{инд}$ составляет с направлением магнитного потока левовинтовую систему; но если принять $e_{инд}$ противоположно направленной, то $e_{инд}=d\Psi/dt$.

Абсолютное большинство принявших участие в дискуссии по статье А.В. Нетушила [3], проходившей на страницах журнала «Электричество» в 1986 1988 гг., высказалось за запись индуцируемой ЭДС со знаком плюс, с тем чтобы исключить необоснованное количество минусов в уравнениях и на векторных диаграммах трансформатора.

На рис. 3 и 4 приведены схемы и уравнения трансформатора, представляемого проходным четырехполюсником (рис. 3) и пассивным четырехполюсником (рис. 4) при различном выборе условно положительных направлений индуцируемых ЭДС встречающихся в различных современных вузовских учебниках.

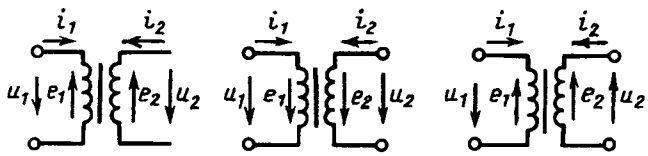



**Рис. 3.** Схемы и уравнения трансформатора, рассматриваемого как проходной четырехполюсник при различном выборе направлений индуцируемых ЭДС:
*а* — $\dot{U}_1=\dot{E}_1+\underline{z}_1\dot{I}_1$, $\dot{U}_2=\dot{E}_2-\underline{z}_2\dot{I}_2$; *б* — $\dot{U}_1=-\dot{E}_1+\underline{z}_1\dot{I}_1$, $\dot{U}_2=-\dot{E}_2-\underline{z}_2\dot{I}_2$; *в* — $\dot{U}_1=-\dot{E}_1+\underline{z}_1\dot{I}_1$, $\dot{U}_2=\dot{E}_2-\underline{z}_2\dot{I}_2$

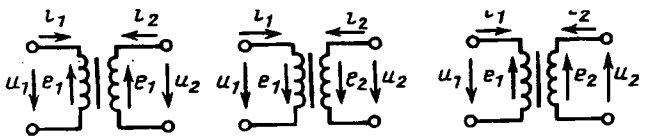



**Рис. 4.** Уравнения трансформатора, рассматриваемого как пассивный четырехполюсник при различном выборе направлений индуцируемых ЭДС:
*а* — $\dot{U}_1=\dot{E}_1+\underline{z}_1\dot{I}_1$, $\dot{U}_2=\dot{E}_2+\underline{z}_2\dot{I}_2$; *б* — $\dot{U}_1=-\dot{E}_1+\underline{z}_1\dot{I}_1$, $\dot{U}_2=-\dot{E}_2+\underline{z}_2\dot{I}_2$; *в* — $\dot{U}_1=\dot{E}_1+\underline{z}_1\dot{I}_1$, $\dot{U}_2=-\dot{E}_2-\underline{z}_2\dot{I}_2$

Схема замещения трансформатора представляется Т-образным четырехполюсником (рис. 5). Уравнение Т-образного четырехполюсника в матричной форме $\underline{U}=\underline{Z}\,\underline{I}$. Для всех выбранных направлений токов, ЭДС и напряжений (рис. 3) матрица $\underline{Z}$ несимметрична, так как рассматривается направленная передача энергии, и равна

$$\underline{Z} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_1 - \underline{Z}_0 & \underline{Z}_0 \\ -\underline{Z}_0 & \underline{Z}_0 - \underline{Z}_2' \end{vmatrix}.$$

Для схем пассивного четырехполюсника рис. 4,*а* и *б* матрица

$$\underline{Z} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_1 - \underline{Z}_0 & -\underline{Z}_0 \\ -\underline{Z}_0 & \underline{Z}_2' - \underline{Z}_0 \end{vmatrix}$$

симметрична, в то же время при традиционном

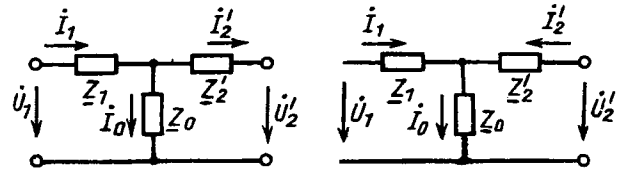



**Рис. 5.** Схемы замещения трансформатора: *а* — проходной четырехполюсник; *б* — пассивный четырехполюсник

выборе условно положительных направлений (рис. 4,*в*) матрица $\underline{Z}$ несимметрична,

$$\underline{Z} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_1 - \underline{Z}_0 & \underline{Z}_0 \\ \underline{Z}_0 & \underline{Z}_0 - \underline{Z}_2' \end{vmatrix},$$

в связи с изменением выбора положительного направления $\dot{U}_2'$ в пассивном четырехполюснике.

Исходя из того, что матрица $\underline{Z}$ одна и та же для всех выбранных направлений токов, напряжений и ЭДС (рис. 3), то предпочтение должно быть отдано схеме с меньшим числом минусов, составленной на единой методологической основе с рассмотрением устройств как двухполюсников и четырехполюсников (рис. 3,*а*). Из схем рис. 4 предпочтительнее оказывается схема рис. 4,*а*. Именно этот вывод был сделан А.В. Нетушилом в [3], где был проведен выбор лучшего варианта с использованием теории выбора и принятия решений. Из двух выбранных схем (рис. 3,*а* и 4,*а*) схема на рис. 3,*а* выбора условно положительных направлений токов, ЭДС и напряжений полностью соответствует определению трансформатора.

При рассмотрении энергосистем, где трансформатор используется как устройство для согласования передачи энергии, возможно применение пассивной модели трансформатора с симметричной матрицей $\underline{Z}$.

Новые публикации [2, 7, 8] лишь подтверждают ранее сделанные выводы [3], поддерживаемые учеными не только России, но и зарубежных стран [5, 6]. И, по-видимому, тормозом для внедрения рационального выбора условно положительных направлений является только верность традициям и привычка к изложению материала вне системного подхода.

## *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. **Основы** теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. **Ли Цзылян, Чэнь Вэй.** О выборе условно положительных направлений электрических величин при анализе схем трансформаторов. — Электричество, 1995, № 5.
3. **Нетушил А.В.** О системном подходе в преподавании электротехнических дисциплин. — Электричество, 1986, № 5.
4. **Нетушил А.В.** Зачем столько минусов в векторных диаграммах и схеме замещения трансформатора? — Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1983, № 9.
5. **Булгаков Н.И.** Об устранении несогласованностей в изложении теории трансформаторов, Электричество, 1984, № 1.
6. **Smith Ralph J.** Circuits, Devices and Systems. — New York, Toronto: John Wiley and sons, fourth edition, 1984.
7. **Фаттахов К.М.** Об уравнениях трансформатора и асинхронной машины. — Электричество, 1995, № 2.
8. **Аллатов М.Е.** Взаимная электрическая модель трансформатора. — Электричество, 1996, № 3.

*[26.11.95]*

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# Изяслав Борисович Пешков

*(К 60-летию со дня рождения)*

Видному электротехнику, профессору, доктору технических наук, действительному члену Академии технологических наук, Академии электротехнических наук и Академии инженерных наук Российской Федерации, заслуженному деятелю науки и техники России Изяславу Борисовичу Пешкову исполнилось 60 лет.

И.Б. Пешков прошел славный трудовой путь от инженера до руководителя кабельной промышленности и генерального директора Всероссийского научно-исследовательского института кабельной промышленности (ВНИИКП). В 1960 г. И.Б.Пешков с отличием окончил Московский энергетический институт. С 1959 г. работает во ВНИИКП, с 1970 г. — директор этого института, с 1986 г. — генеральный директор НПО «ВНИИКП», созданного на базе института. С 1987 по 1995 гг. Изяслав Борисович — генеральный директор межотраслевого научно-технического комплекса «Световод», с 1989 г. по настоящее время — председатель правления Ассоциации «Электрокабель», объединяющей все заводы, научно-исследовательские институты и конструкторские бюро кабельной промышленности бывшего СССР, а с 1994 г. одновременно и президент этой Ассоциации. После акционирования головного института кабельной промышленности является также генеральным директором АО «ВНИИКП».

И.Б. Пешковым лично и под его научным руководством выполнено несколько циклов научных исследований, связанных с исследованиями в области высоковольтной кабельной техники, теории надежности кабельных изделий, в первую очередь,

проводов для обмоток различных электротехнических устройств, новейшей технологии производства кабелей и проводов, в том числе с использованием достижений оптоэлектроники, радиационной техники, техники сверхпроводимости и т. д.

Теоретически и экспериментально исследованы закономерности, характеризующие нагревостойкость и сроки службы обмоточных проводов, и предложены новые методы определения этих показателей с учетом однородности дисперсии полученных данных и линейности зависимости логарифма ресурса от значения обратной температуры, а также определения доверительных границ линий регрессии в различных вариантах, включая случай неоднородных дисперсий. Предложены критерии оценки наработки проводов в составе оборудования. Установлены методы оценки оптимальности технологии производства проводов. Выполнен теоретический анализ и получены расчетные выражения для определения напряженности электрического поля в изоляции эмалированных проводов с учетом неоднородности среды, что позволило установить обоснованный ряд испытательных напряжений изоляции.

Усовершенствована технология производства кабелей переменного тока на напряжение 500 кВ, оптимизированы режимы сушки бумажной изоляции этих кабелей и ее пропитки высоковязкими минеральными маслами. Установлены оптимальные режимы испытания кабелей. Кабели на напряжение 500 кВ, главным конструктором которых являлся И.Б.Пешков, успешно эксплуатируются на крупнейших гидроэлектростанциях страны (Усть-Илимская, Токтогульская, Нижне-Камская).

Под руководством И.Б.Пешкова разработана и освоена технология производства кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 110 кВ. Проведен комплекс исследований надежности кабелей такого типа с целью создания методов оценки их ресурса. Предложены математические модели развития водных и электрических триингов. Общий подход к моделированию старения электрической изоляции основывается на том, что кабель рассматривается как термодинамически открытая система, воспринимающаяся из окружающей среды и смежных элементов конструкции потоки тепловой и электрической энергии, а также различные вещества, воздействующие на изоляцию. В результате с учетом дополнительных экспериментальных исследований предложены методы расчета ресурса высоковольтных кабелей с полимерной изоляцией. Полученные теоретические представления используются для решения практических задач по конструированию кабелей, разра-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ботке технологических режимов, программ типовых и ресурсных испытаний, выбору допустимых условий эксплуатации.

И.Б. Пешков — известный ученый в области электротехники, в частности, в области электрической изоляции и кабельной техники. Его работы получили международное признание. В течение 12 лет он был членом комитета 21 СИГРЭ, возглавляет национальные рабочие группы МЭК. И.Б. Пешков — президент международной Ассоциации «Интеркабель» и член правления Всемирной кабельной федерации.

И.Б. Пешков — лауреат премии Совета Министров СССР за цикл работ по созданию и внедрению технологии облучения (радиационного модифицирования) электрической изоляции кабелей и проводов, обеспечивающей резкое повышение нагревостойкости и других характеристик изоляции.

Большая научно-техническая и производственная деятельность И.Б. Пешкова отмечена высокими правительственными наградами. Он награжден орденом Ленина, двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденом Труда серебряной степени Венгрии и медалями.

И.Б. Пешковым опубликовано 280 научных работ, среди которых 67 изобретений, он — профессор МЭИ, под его руководством защищено 13 кандидатских диссертаций. Изяслав Борисович член редколлегии журнала «Электротехника», председатель редколлегии трудов ВНИИКП и журнала «Кабельная техника», председатель специализированных ученых советов АО «ВНИИКП», МЭИ.

Электротехники России и других стран СНГ горячо поздравляют Изяслава Борисовича Пешкова со знаменательной датой, желают ему крепкого здоровья и успехов в работе по дальнейшему развитию кабельной и электроизоляционной техники.

*Группа товарищей и учеников*

# Памяти Георгия Константиновича Жерве

В июле прошлого года скончался Георгий Константинович Жерве, крупнейший специалист в области электромашиностроения. Его творческая деятельность совпала с эпохой становления и развития этой отрасли в нашей стране и во многом определила ее успехи.

Георгий Константинович Жерве родился 26 мая 1904 г. в семье штабс-капитана Российской Армии. В конце XVII столетия его предки, по преданию бывшие гугенотами, покинули Францию и через Германию и Швецию попали в Россию. Служили Жерве главным образом в армии и во флоте.

Георгий Константинович стал инженером, нарушив тем самым семейную традицию. В 1923 г. он приехал из теплого Батума в холодный Петроград, чтобы поступить в Политехнический институт. Но оказалось, что почти все места на электромеханическом факультете заполнены поступающими по профсоюзным и партийным путевкам, и поэтому Георгий Жерве подал еще на конкурс в Архитектурный институт и держал экзамен по рисунку. Тем временем в Политехническом стараниями А.Ф. Иоффе открылся новый физико-механический факультет, на который принимали по конкурсу. Г.К. Жерве сдал экзамены и был зачислен. Администрация Архитектурного института была огорчена: оказалось, что он выдержал экзамен по рисунку первым из 150 абитуриентов!

Получив диплом инженера-физика, молодой Г.К. Жерве должен был работать на Обуховском заводе, но там не оказалось вакансий. А на «Электросиле» технический директор А.С. Шварц создавал испытательный отдел. Г.К. Жерве поступил туда и под руководством М.П. Костенко и Д.В. Ефремова быстро стал одним из ведущих специалистов электромашинной лаборатории.

Во всех больших фирмах мира имеются исследовательские подразделения. Как правило, в них работают крупные ученые, личный авторитет которых повышает авторитет фирмы, увеличивает ее коммерческий успех. По инициативе ведущих специалистов в конце 20-х годов на «Электросиле» возник исследовательский отдел ОБИС. Его работники занимались расчетами, испытаниями, отработкой конструкций новых машин, словом, выполняли работу, обычно поручаемую научно-исследовательским институтам, которых тогда в стране было мало. Здесь Жерве проработал до 1933 г., когда новый директор закрыл ОБИС, переведя из него инженеров в цех. Машинная лаборатория оказалась в ОТК, где Г.К. Жерве проработал до 1936 г. постоянно испытывая притеснения нового начальства. В 1937 г. он перешел на завод «Электрик», но через 3 года по приглашению главного инженера вновь вернулся на «Электросилу» с правом проводить нестандартные испытания. С тех пор он проработал на «Электросиле» еще полвека.

Во время войны Г.К. Жерве участвовал в восстановлении и пуске гидрогенераторов Волховской ГЭС, от которой энергия поступала в осажденный Ленинград, в Челябинске участвовал в пуске 100-тысячного генератора, энергия от которого питала знаменитые танковые заводы Урала.

Вернувшись в Ленинград Г.К. Жерве продолжал работать на «Электросиле». Он проводил

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

самые сложные испытания новых машин, разрабатывал новые методы испытаний и очень хорошо обучал этому трудному делу молодежь.

В это время он написал несколько замечательных книг. Его книги «Расчет машины постоянного тока при перемотке» и «Расчет асинхронного двигателя при перемотке» были рассчитаны на читателя-электромонтера и излагались на предельно доступном уровне. В эти же послевоенные годы вышла первым изданием главная книга его жизни «Промышленные испытания электрических машин». Книга много раз переиздавалась, и каждое новое издание основательно перерабатывалось автором.

С 1944 г. на «Электросиле» почти 40 лет издавался научно-технический сборник. Г.К. Жерве был членом редколлегии и долгие годы одним из научных редакторов, во многих сборниках печатались его статьи.

В середине 50-х годов на «Электросиле» организовали научно-исследовательский институт, куда вошли со временем все конструкторские отделы завода и заводские лаборатории. Долгие годы Г.К. Жерве возглавлял в институте отдел исследования электрических машин.

Г.К. Жерве первым стал использовать при испытаниях электрических машин в качестве привода синхронную машину с поворотной осью намагничивания, что позволяло снять любую характеристику обычного синхронного генератора или двигателя в нужных пределах и, что очень важно, установил такие машины на лабораторных стендах. Он разработал множество схем для испытаний самых разных машин методом взаимной нагрузки и применил эти методы в заводской практике. Когда встал вопрос о необходимости более представительных испытаний мощных турбогенераторов, то именно Г.К. Жерве предложил впоследствии реализованный метод взаимной нагрузки. В этой схеме один из двух соединенных валами генераторов работает двигателем и вращает второй, работающий генератором и питающий электрической энергией первый, так что основной поток мощности циркулирует по короткому шинопроводу и создает полный момент между двумя машинами. Из внешней сети поступает только мощность, равная суммарным потерям этих двух машин (1,5—2% их мощности). Меняя угол сдвига магнитных осей роторов сопряженных генераторов, можно менять взаимную нагрузку. Такого стенда, построенного на «Электросиле» в 70-е годы, не было ни у одной фирмы мира. За его сооружение группе проектантов и строителей была присуждена Государственная премия РСФСР (фамилии Г.К. Жерве в списке лауреатов не было).

Теория и практика применения метода взаимной нагрузки для испытаний мощных энергетический машин блестяще изложена в книге Г.К. Жерве «Вопросы испытаний крупных турбогенераторов». Впервые в мировой технической литературе описывалась такая методика испытаний, которая позволяет максимально приблизить режим работы машин на стенде к условиям их работы на электростанции — не только по токам и напряжениям, но и по механическим нагрузкам.

Множество новых технических решений, предложенных Жерве, было как это принято говорить, защищено авторскими свидетельствами, к сожалению, ничего ни от кого не защищающими. Изобретения Жерве в значительной мере относятся к методам испытаний и устройствам для их реализации. Среди них методы измерения сопротивлений обмоток на переменном токе, потерь на основе калориметрии и самоторможения, определения электромагнитных параметров в условиях стенда и на местах установки. Благодаря высочайшей эрудиции и творческому мышлению, он лучше многих ощущал пределы достоверности результатов испытаний.

Г.К. Жерве интересовался не только методами испытаний. Он много занимался обмотками и разработал несколько оригинальных схем обмоток турбогенераторов с числом параллельных ветвей, большим числа полюсов. Такие обмотки теоретически всегда несимметричны, но на практике, чего и добивался Г.К. Жерве, можно свести эту несимметрию до допустимо малой. Последняя книга, написанная Георгием Константиновичем, была посвящена обмоткам электрических машин.

Георгий Константинович хорошо знал, любил и понимал искусство, особо ценя живопись, скульптуру, архитектуру и литературу. С ним было интересно беседовать на любую тему. Но главным достоинством его характера было органическое неприятие подлости, нетерпимости и хамства. Он никогда не становился соавтором, если не делал большей части работы, и всегда подчеркивал вклад других участников совместного труда. Большинство своих научных трудов он писал один. Он никогда никому не льстил и ни перед кем не заискивал, никогда не стеснялся высказывать свое мнение, даже если оно в корне расходилось с официальным. Такие черты характера вызывали, конечно, уважение одних и явную или скрытую неприязнь других. Возможно, именно поэтому Г.К. Жерве, кроме короткой командировки в Германию осенью 1945 г., никогда не посылали за границу.

До последних дней своей долгой жизни Георгий Константинович не утратил ясности ума, твердости духа и мировоззрения, главной составляющей которого были исполнение долга, честь и независимость.

Как грустно, когда такие люди уходят из этой жизни. Все, знавшие Георгия Константиновича Жерве, сохранят в своих душах долгую и светлую память о нем.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

# 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 (Научно-исследовательский институт электроэнергетики, Москва), **Гельфанд Я.С.** (Научно-исследовательский институт электроэнергетики, Москва), **Ершевич В.В.** (Проектный и научно-исследовательский институт «Энергосетьпроект», Москва), **Митюшкин К.Г.** (Научно-исследовательский институт электроэнергетики, Москва), **Морозкин В.П.** (Московский энергетический институт), **Семенов В.А.** (Центральное диспетчерское управление Единой энергетической системы России), **Строев В.А.** (Московский энергетический институт).

Научный редактор — **Кудинова Л.С.**

**Секция техники высоких напряжений, электрических аппаратов, трансформаторов**

**Ларионов 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 электрозавод).

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.** (аучно-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 институт), **Ильинский Н.Ф.** (Московский энергетический институт), **Шаталов А.С.** (Научно-техническое объединение «Антей», Москва).

Научный редактор — **Евсеев Б.Н.**



Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru