

# **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

**1964**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»**

**6**

## СОДЕРЖАНИЕ

Д. Т. Комаров—Электричество—на службу сельскому хозяйству . . . . .	1	68
В. Л. Фабрикант и Л. А. Орехов—Принципы построения продольной дифференциальной защиты для линий с ответвлениями . . . . .	7	74
Л. М. Вайнштейн и Н. А. Мельников—Исследование сложных несимметричных эксплуатационных режимов работы сетей на расчетной модели постоянного тока с применением обобщенных параметров . . . . .	13	77
Д. Е. Трофименко—Ресинхронизация гидрогенератора электрическим торможением . . . . .	21	
И. В. Литкенс и В. П. Васин—Работа электрических систем с АРВ сильного действия вблизи границы области устойчивости . . . . .	24	
Г. А. Кукеков—Характеристики процесса истечения воздуха в дугогасителе воздушного выключателя	31	85
С. Д. Холодный—Нагревание и охлаждение кабеля, проложенного в земле . . . . .	35	
А. И. Бронфман—Электрическая прочность искрового промежутка с вращающейся дугой магнитно-вентильных разрядников . . . . .	40	
Г. Н. Александров и В. Л. Иванов—Зависимость электрической прочности длинных воздушных промежутков от частоты колебательного напряжения . . . . .	44	
Б. К. Чемоданов и Г. И. Феклисов—Исследование цифровых автоматических систем методом логарифмических характеристик . . . . .	49	
О. Н. Мельников—Повышение быстродействия магнитного усилителя с выходом на постоянном токе, работающего на индуктивную нагрузку . . . . .	56	
Б. И. Киркин и Л. С. Линдорф—Определение пусковых характеристик синхронных двигателей . . . . .	63	



## CONTENTS

Electric Power at the Service of Agriculture — D. T. Komarov . . . . .	1
Principles for Pilot Relaying of Tapped Lines — V. L. Fabrikant, L. A. Orehov . . . . .	7
A D. C. Calculating Board Study of Normal Network Operating Conditions with Multiple Dissymmetries Using Generalized Parameters — L. M. Weinstein, N. A. Melnikov . . . . .	13
Resynchronization of a Water-wheel Generator by Electric Braking — D. E. Trofimenco . . . . .	21
Operation of Power Systems with Derivative Type Generator Field Regulation Near the Boundary of the Stability Region — I. V. Litkins, V. P. Vasin . . . . .	24
Characteristics of the Air-Blast Process in the Arc Quencher of an Air Breaker — G. A. Kukelov . . . . .	31
Heating and Cooling of a Cable Laid in the Ground — S. D. Holodni . . . . .	35
The Electric Withstand Strength of a Gap with a Revolving Arc in Magnetic Valve Type Arrestors — A. I. Bronfman . . . . .	40
How the Electric Withstand Strength of Long Air Clearances Varies with the Frequency of the Oscillating Voltage — G. N. Alexandrov, V. L. Ivanov . . . . .	44

A Study of Automatic Digital Systems by the Method of Logarithmic Characteristics — B. K. Chemodanov, G. I. Feklisov . . . . .	49
Increasing the Speed of Response of a Magnetic Amplifier with a D. D. Output Having an Inductive Load — O. N. Melnikov . . . . .	56
Determining the Starting Characteristics of Synchronous Motors — B. I. Kirkin, L. S. Lindorf . . . . .	63
Vector Diagrams for Non-symmetrical Operation of a Synchronous Machine with an Unsymmetrical Stator Winding — V. M. Alabiev . . . . .	68
Application of Superconductors for Electric Machine Excitation — E. J. Kazovski, V. P. Kartsev . . . . .	74
On the Theory and Application of Three-phase System Components — A. B. Vifanov . . . . .	77
<b>FROM OPERATING EXPERIENCE</b>	
Calculating the Steady-state of a Synchronous Generator — Induction Motor System on an Analogue Computer — L. E. Sheinman . . . . .	85
<b>DISCUSSION</b> . . . . .	86
<b>CHRONICLE</b> . . . . .	92
<b>BIBLIOGRAPHY</b> . . . . .	93



# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

6  
1964  
ИЮНЬ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА  
ПО КООРДИНАЦИИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ СССР И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.37:621.3

## Электричество — на службу сельскому хозяйству

Д. Т. КОМАРОВ

Главный инженер Глаавсельэнерго  
Государственного производственного  
комитета по энергетике  
и электрификации СССР

Решения февральского Пленума ЦК КПСС «Об интенсификации сельскохозяйственного производства на основе применения удобрений, развития орошения, комплексной механизации и внедрения науки и передового опыта для быстрейшего увеличения производства сельскохозяйственной продукции» играют большую роль в свете задач, поставленных XXII съездом КПСС, по крутому подъему сельского хозяйства в нашей стране.

Интенсификация земледелия и животноводства, широкое применение химии, комплексной механизации и электрификации в колхозном и совхозном производстве — главные условия подъема сельского хозяйства и удовлетворения возрастающих потребностей народа в продуктах питания.

Основой повышения производительности сельскохозяйственного труда является широкое применение новой, более прогрессивной техники, применение комплексной механизации и использование средств автоматики, внедрение систем машин с высокими технико-экономическими показателями. В свою очередь повышение уровня технического прогресса в сельском хозяйстве немыслимо без электрификации. «Всем нашим кадрам необходимо осознать, — говорил Н. С. Хрущев на Пленуме ЦК КПСС, — что механизация, электрификация и химизация сельского хозяйства — решающее условие повышения производительности труда, увеличения производства сельскохозяйственных продуктов».

Сельская электрификация решает задачу не только повышения производительности труда в сельском хозяйстве, но и превращения его в разновидность труда индустриального и обеспечивает резкое повышение культурно-бытовых условий жизни сельского населения, приближая этот уровень к городскому.

Партия и правительство всегда уделяли и уделяют большое внимание электрификации сельского хозяйства. Темпы и характер работ в этой области определялись на различных этапах как общими народнохозяйственными возможностями, так

и особенностями развития самого сельского хозяйства.

До 1953 г. было электрифицировано только 22% колхозов, в среднем на один колхоз приходилось по 4,9 электродвигателя, а потребление электроэнергии составляло 38 тыс. квт·ч. Такое отставание сельской электрификации было вызвано недостаточным уровнем развития электроэнергетики, и в особенности электрических сетей. Но были и причины субъективного характера, которые состояли в недооценке Сталиным электрификации как основы создания материально-технической базы коммунизма и в противопоставлении государственной и колхозно-кооперативной собственности. Это нашло воплощение в политике, которая проводилась по отношению к электрификации колхозов.

Подключение сельских потребителей к государственным энергосистемам и к линиям крупных электростанций даже там, где это было экономически целесообразно и не составляло технических трудностей, было запрещено. Не разрешалось также строить в сельской местности электростанции на жидком топливе.

Естественно, такое искривление ленинской политики электрификации сельского хозяйства значительно затормозило ее развитие, особенно электромеханизацию трудоемких процессов в животноводстве, которую не могли обеспечить электроэнергией мелкие, неэкономичные колхозные электростанции.

Поэтому не случайно на сентябрьском (1953 г.) Пленуме ЦК КПСС отмечена необходимость расширения работ по электрификации сельскохозяйственного производства путем присоединения колхозов и совхозов к государственным энергосистемам. После этого Пленума, когда партия наметила программу крутого подъема сельского хозяйства, темпы электрификации сельского хозяйства значительно возросли. Увеличилось количество колхозов и совхозов, получающих электроэнергию от крупных электростанций и энергосистем.

За истекшие десять лет уровень электрификации колхозов увеличился с 22 до 87%, совхозов с 88 до 100%, электрификации дворов колхозников с 12 до 62%. Потребление электроэнергии в сельском хозяйстве возросло с 2 млрд. квт·ч до 17 млрд. квт·ч, или в 6,2 раза, при этом около 11 млрд. квт·ч отпущено государственными энергосистемами.

Характерной тенденцией электрификации колхозов и совхозов является все более широкое использование электроэнергии на производственные нужды. В 1962 г. на производственные цели в колхозах было израсходовано 54% от общего потребления электроэнергии, а в совхозах — 69%. Количество электродвигателей в расчете на один электрифицированный колхоз возросло в 4,5 раза, а в совхозах — в 3 раза.

Отдельные хозяйства уже сейчас достигли высокого уровня электрификации процессов сельскохозяйственного производства. Например, в колхозе «Запорожская сечь» Червоноармейского района Запорожской области УССР на различных процессах производства работают 178 электродвигателей мощностью 1 140 квт. Для электроснабжения колхоза построено 22 трансформаторные подстанции мощностью 1 500 ква и 55 км низковольтных сетей. За год колхозом потреблено 1 798 тыс. квт·ч электроэнергии.

В Бородулинском совхозе Сысертского района Свердловской области работают 186 электродвигателей мощностью 954,7 квт, годовое потребление электроэнергии здесь составляет 1 451 тыс. квт·ч. В колхозе Кзыл-Узбекистан Орджоникидзевского района Ташкентской области имеется 85 электродвигателей мощностью 717 квт, электроснабжение колхоза осуществляется через 12 трансформаторных подстанций мощностью 1 270 ква и 78 км низковольтных сетей. За год потреблено 2 275 тыс. квт·ч электроэнергии.

Особенно быстро электрификация сельского хозяйства стала развиваться в текущей семилетке. Большую роль в этом сыграло специальное постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 21 февраля 1961 г. № 160 «Об электрификации сельского хозяйства СССР в 1961—1965 гг.».

В этом постановлении определено направление развития электрификации сельского хозяйства путем присоединения сельских потребителей к существующим и вновь сооружаемым электросетям государственных энергосистем, к тяговым подстанциям электрифицированных участков железных дорог, а в районах, удаленных от электросетей государственных энергосистем, путем строительства районных и межрайонных дизельных электростанций укрупненной мощности. Установлено задание на пять лет по строительству сельских электрических сетей всех напряжений общей протяженностью 1 319 тыс. км. Получив правильное направление технической политики в электроснабжении сельского хозяйства, сельские электрифициаторы провели большую работу по наращиванию темпов ее развития.

Центральный Комитет КПСС и Совет Министров СССР, образовав Союзно-республиканский гор-

сударственный производственный комитет по энергетике и электрификации СССР, возложили на Комитет и на его подразделения в республиках и областях задачу ускорения электрификации сельского хозяйства и выполнение предначертаний В. И. Ленина о сплошной электрификации страны.

Эта важнейшая задача и огромное доверие партии и народа воодушевляют коллективы энергетиков страны на преодоление трудностей при выполнении государственных планов электросетевого строительства и на обеспечение бесперебойного электроснабжения сельских потребителей.

Государственным производственным комитетом по энергетике и электрификации СССР взят твердый курс на быстрое присоединение сельских потребителей электроэнергии к государственным энергосистемам, где себестоимость электроэнергии в 8 и более раз дешевле электроэнергии, вырабатываемой мелкими и неэкономичными электростанциями колхозов и совхозов.

В 1963 г. строительно-монтажные организации Госкомитета ввели в действие сельских линий электропередачи с подстанциями общей протяженностью около 200 тыс. км, что на 35% больше, чем было введено за 1962 г., и равно всем высоковольтным линиям, имевшимся в сельских районах страны на конец 1958 г. О возрастающих объемах работ по электросетевому строительству по сельской электрификации в текущей семилетке свидетельствуют данные, приведенные в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Годы	1959	1960	1961	1962	1963
Введено в действие линий всех напряжений, тыс. км . . . . .	109,7	122	125,3	144,4	199,2
В том числе:					
ЛЭП 35 кв . . . . .	3,9	8,2	7,7	9,1	13,2
ЛЭП 10 кв . . . . .	46,2	52,2	54,0	65,4	88,6
н/в сетей . . . . .	59,6	61,6	63,6	69,9	97,4

Таблица 2

## Потребление электроэнергии в сельском хозяйстве

Годы	1958	1959	1960	1963
Всего по СССР, млрд. квт·ч .	2,74	6,91	9,93	17
В том числе:				
на производственные цели .	1,34	4,10	5,79	9,5
на культурно-бытовые нужды . . . . .	1,4	2,91	4,14	7,5
на душу сельского населения, квт·ч . . . . .	25	55	92	160

По расчетам экономистов темпы электрификации колхозов и совхозов в нашей стране за последние годы почти в 3 раза выше темпов электрификации ферм в США в лучший период их работы по электрификации сельского хозяйства, которая осуществлялась там в течение 30 лет.

Но, несмотря на высокие темпы работ по электроснабжению сельского хозяйства, развитие сельской электрификации в СССР отстает от требова-

ний сельскохозяйственного производства. К началу 1964 г. около 40% колхозов и совхозов получали электроэнергию от мелких неэкономичных электростанций.

В электрифицированных колхозах и совхозах потребление электроэнергии на производственные нужды крайне недостаточное из-за отсутствия комплексного технологического оборудования и недостатка электродвигателей для электромеханизации производства. В начале 1964 г. насчитывалось лишь 1,6 млн. электродвигателей средней мощностью 6 квт, в среднем по 22 электродвигателя на колхоз и по 75 электродвигателей на совхоз. Около 46% электрифицированных колхозов и 12% совхозов имели до 10 электродвигателей на хозяйство или примерно столько, сколько требуется для работы одной доильной установки типа «Карусель».

Расчеты и опыт передовых электрифицированных колхозов и совхозов показывают, что уже в настоящее время для перевода на электрический привод только основных стационарных машин в среднем на один колхоз необходимо иметь 50 электродвигателей, на один совхоз свыше 100 электродвигателей, а при завершении комплексной механизации количество электродвигателей на каждое хозяйство возрастет в 2—3 раза.

Комплексная механизация на животноводческих фермах позволит повысить производительность труда в 3—5 раз. Так, например, в совхозе «Лотошинский» Московской области на животноводческой ферме в 200 голов скота было занято 23 человека, а после перевода коров на беспривязное содержание при комплексной механизации осталось только 6 человек.

По данным Всесоюзного института электрификации сельского хозяйства затраты труда в сельскохозяйственном производстве при его полной электрификации снижаются по сравнению с существующими на 1 центнер молока с 10—15 чел·ч до 3—5 чел·ч, на один центнер привеса свиней с 83—100 чел·ч до 4—7 чел·ч, на 1 000 яиц — с 23 чел·ч до 3—4 чел·ч.

В отдельных хозяйствах с высоким уровнем электромеханизации сельскохозяйственного производства применение электроэнергии дает значительный экономический эффект. В колхозе «Россия» Шуйского района, Ивановской области от электромеханизации трудоемких процессов в хозяйстве за год было сэкономлено трудодней: в животноводстве — 6 200, в растениеводстве — 2 100, в механических мастерских и подсобных предприятиях — 8 900. Всего 17 200 трудодней, или около 12% от общего числа выработанных в колхозе трудодней.

В колхозе «Вперед» Красноармейского района, Челябинской области работает 102 электродвигателя общей мощностью 700 квт. Потребление электроэнергии в этом колхозе превышает за год 1 млн. квт·ч, и электричество заменяет труд 160 колхозников в год. На ферме электрифицированы процессы приготовления и раздачи кормов, доения коров и охлаждения молока, подогрева воды и поения коров, уборки навоза и других работ.

Еще больше отстает электрификация быта сельского населения, где потребление электроэнергии на одного жителя составляет лишь 60 квт·ч в год, в то время как жители наших городов потребляют свыше 360 квт·ч на человека в год.

Одна из основных причин слабого использования электроэнергии в сельскохозяйственном производстве и в быту сельского населения — недостаточная по мощности и ненадежная база электроснабжения колхозов и совхозов. В сельском хозяйстве работает более 100 тысяч электростанций на общую мощность 4,5 млн. квт, которые вырабатывают порядка 6 млрд. квт·ч электроэнергии с себестоимостью до 5—6 коп/квт·ч, а в отдельных хозяйствах до 10 и даже до 20 коп/квт·ч, в то время как средняя себестоимость электроэнергии в государственных энергосистемах в целом по Комитету составила за 1963 г. 0,73 коп/квт·ч.

Мощности государственных электростанций уже в настоящее время позволяют по потребности обеспечивать сельское хозяйство дешевой электроэнергией от энергосистем, однако подключение сельских потребителей к энергосистемам сдерживается крайне недостаточным количеством сельских электросетей и трансформаторных подстанций, а в электрифицированных хозяйствах недостаточным оснащением средствами электромеханизации технологических процессов.

Кроме указанных, существуют еще следующие причины неудовлетворительного внедрения электричества в сельскохозяйственное производство: ненадежность электроснабжения, частые плановые и аварийные отключения потребителей, недопустимо высокий травматизм, низкая культура и низкий технический уровень эксплуатации объектов сельской электрификации как в энергосистемах Госкомитета, так и особенно в сетях и электроустановках колхозов и совхозов, недостаточность персонала и низкая его квалификация, неудовлетворительная организация эксплуатации энергохозяйства, несвоевременность и низкое качество ремонта сетей и электроустановок и плохая обеспеченность материалами для ремонтно-эксплуатационных нужд.

В настоящее время проводятся мероприятия по улучшению руководства эксплуатацией и ремонтом всех объектов электроснабжения на селе, на районные энергетические управления и на соответствующие главные управления и министерства энергетики и электрификации в республиках возложена работа по эксплуатации и ремонту электроустановок со всей полнотой ответственности их надежное и бесперебойное электроснабжение сельских потребителей.

Созданы строительно-монтажные тресты и управления по строительству объектов сельской электрификации, а также трест для комплектной поставки оборудования и конструкций. Организуются механизированные колонны для поточного строительства электрических сетей. Расширяются мощности производственных баз и заводов стройиндустрии для удовлетворения возрастающих потребностей сельской электрификации.

Проводимые Госкомитетом мероприятия позволяют в ближайшие годы значительно улучшить положе-

жение с электроснабжением сельского хозяйства, навести порядок в эксплуатации и ускорить электрификацию сельского хозяйства.

В начале февраля 1964 г. Комитетом проведено Всесоюзное совещание по электрификации сельского хозяйства с участием руководящих работников районных энергетических управлений, строительно-монтажных и проектных организаций, а также представителей сельскохозяйственных органов и руководителей некоторых колхозов и совхозов.

На совещании были подведены итоги выполнения плана сельской электрификации за 1963 г., вскрыты имеющиеся недостатки в электроснабжении сельских потребителей и намечены конкретные мероприятия по улучшению эксплуатации сельских электрических сетей и электроустановок и выполнению плана электрификации сельского хозяйства в 1964 г.

Перед руководителями энергосистем, районов электрических сетей, участков и служб поставлена задача в ближайшее время навести порядок в эксплуатации всех электрических сетей и подстанций, организовать необходимые ремонтно-восстановительные работы как в хозяйствах, находящихся у них на балансе, так и особенно в энергохозяйствах колхозов и совхозов; обеспечить нормальную и надежную эксплуатацию всех объектов электроснабжения, принять меры к резкому сокращению плановых и аварийных отключений, взять под технический надзор и оказывать необходимую помощь объектам сельской электрификации в колхозах и совхозах, расположенных на территории деятельности энергосистемы.

Руководители энергосистем и соответствующие службы этих систем должны анализировать и изучать потребление электроэнергии в сельском хозяйстве, совместно с сельхозорганами на местах проводить мероприятия по значительному увеличению и рациональному использованию электроэнергии в сельском хозяйстве.

Для быстрого приведения в порядок и улучшения эксплуатации сельских электросетей и подстанций энергосистемы должны в 1964—1965 гг. принять на свой баланс от колхозов и совхозов все высоковольтные электросети и подстанции, присоединенные к линиям электропередачи энергосистем. При этом прием высоковольтных и низковольтных сетей от совхозов должен осуществляться безвозмездно с баланса на баланс, а прием высоковольтных сетей от колхозов — с оплатой в установленном порядке. Назрел вопрос приемки на баланс энергосистем и низковольтных сетей от колхозов с тем, чтобы обеспечивать электроснабжение всех сельских потребителей до ввода в производственные и жилые помещения. Но для этого необходимо решить вопрос о безвозмездной передаче на баланс энергосистем по просьбам заинтересованных колхозов имеющихся у них сетей и подстанций, подключенных к энергосистеме.

Госкомитетом установлено задание на 1964 г. принять 250 тыс. км таких сетей с подстанциями, но для их эксплуатации и ремонта необходимы лимиты по труду, материалы, транспорт и механизмы, которые Госплан СССР и Совнархоз СССР должны выделить.

По мере подключения сельских потребителей к линиям электропередачи энергосистем последние должны принять энергичные меры к выводу в резерв или в демонтаж мелкие неэкономичные электростанции в колхозах и совхозах, добиваясь резкого сокращения таких электростанций. Вместе с этим энергосистемы должны с привлечением местных сельхозорганов и проектных организаций рассмотреть мероприятия по обеспечению электроэнергией потребителей тех районов, которые не подключаются к энергосистемам до 1966 г. за счет установки межрайонных стационарных или передвижных дизельных и турбинных электростанций.

Энергосистемы обязаны контролировать и оказывать помощь строительно-монтажным организациям по строительству и вводу в действие объектов сельской электрификации, обеспечивать своеевременное изготовление проектно-сметной документации, решать вопросы утверждения титулов и финансирования, анализировать положение дел по сельской электрификации как по электроснабжению, так и по строительству, принимая совместно с партийными, советскими и сельскохозяйственными органами на местах необходимые меры помощи.

Особую тревогу вызывает недостаточная обеспеченность и слабая подготовка квалифицированных кадров для объектов сельской электрификации. В связи с этим перед энергосистемами поставлена задача в ближайшее время организовать там, где еще не организованы, учебные комбинаты, которые обеспечивали бы подготовку и повышение квалификации электромонтеров, электрослесарей и мастеров, включая сюда потребность в кадрах электриков для колхозов и совхозов. В учебных комбинатах должна проводиться проверка знаний правил технической эксплуатации и техники безопасности персоналом районов электросетей, а также электриков колхозов и совхозов с выдачей им удостоверений на право работ в электроустановках.

Эти учебные комбинаты должны организовать работу по обучению техминимуму всего сельского населения, обеспечить его массовыми наглядными пособиями по технике безопасности и охране труда, а также организовать широкую пропаганду внедрения электроэнергии в сельской местности.

Признано необходимым, чтобы Министерство высшего и среднего специального образования, Министерство сельского хозяйства СССР и Госплан СССР приняли меры к резкому увеличению подготовки специалистов для сельской электрификации, организовав прием слушателей по этим специальностям на 1964/65 учебный год.

Госкомитет в 1963 г. принял важное решение об улучшении организационной структуры управления энергетикой, включая и сельскую электрификацию, подчинив районным энергоподразделениям областные энергетические эксплуатационные управлении сельского хозяйства Сельэнерго.

Опыт Прибалтийских республик, Белорусской ССР, Тульской и ряда других областей РСФСР показал необходимость создания единой системы управления организациями по электроснабжению промышленных, сельских и коммунальных потребителей. О осуществление этого должно происходить

путем создания единых сетевых предприятий и в них районов электросетей, подчиненных районному энергоуправлению с утверждением в его составе производственной службы по сельской электрификации. При этом энергосистемы должны обратить особое внимание на укрепление низового звена — предприятий (районов) электросетей или участков с правами района электросетей, размещая их применительно к территориальным производственным колхозно-совхозным управлениям.

Все организации по энергонадзору и энергосбыту также должны быть в едином органе — в районном энергетическом управлении с ликвидацией существующей системы перепродажи электроэнергии через Сельэнерго. Госкомитет внес в правительство предложение о проведении сбора платы за электроэнергию почтовыми отделениями Министерства связи, а в городах и рабочих поселках — местными сберегательными кассами.

Для того чтобы успешно выполнить возросшие объемы работ по электрификации сельского хозяйства, необходимо улучшить организацию строительно-монтажных работ, внедрить поточные методы строительства сетей силами механизированных колонн, наладить четкую организацию материально-технического обеспечения. Со стороны руководителей министерств и главных управлений энергетики и электрификации союзных республик, а также главных управлений Госкомитета должно быть усилено внимание, повышена требовательность к строительным организациям и оказана им своеевременная помощь.

Народнохозяйственным планом на 1964 г. предусмотрено строительство и ввод в действие сельских линий электропередачи всех напряжений общей протяженностью 244,3 тыс. км, на 1965 г. — 275,2 тыс. км.

Утвержденный план строительства сельских электрических сетей на 1964—1965 гг. является вполне реальным и посильным для строительно-монтажных организаций, но выполнение его потребует большой напряженной работы всех коллективов. Прежде всего необходимо укомплектовать создаваемые механизированные колонны механизма и автотранспортом.

В текущем и последующих годах строительство сельских электрических сетей и работы по внутренним проводкам в производственных и жилых помещениях колхозов и совхозов должны полностью осуществляться механизированными колоннами, индустриальными методами с применением комплектных трансформаторных подстанций 110/10; 35/10 и 10/0,4 кв, комплектных дизельных передвижных и стационарных электростанций из сборных конструкций, а также при широком внедрении в сетевое строительство железобетонных опор.

Необходимо значительно улучшить организацию труда, использование имеющихся механизмов и автотранспорта, повышать экономические показатели строительно-монтажных работ, вести борьбу за экономное расходование материалов.

Для обеспечения объектов сельской электрификации качественными и долговечными опорами Госкомитет намечает расширить производственные мощности заводов по изготовлению антисептирован-

ных опор. Намечено в 1964—1966 гг. организовать массовый выпуск железобетонных опор.

На совещании были отмечены недостатки в проектировании объектов сельской электрификации. Например, до настоящего времени проектно-сметная документация на строительство сельских электросетей и на электрификацию колхозов и совхозов составляется многочисленными проектными организациями, находящимися в различных ведомствах.

В Госкомитете работы по проектированию электрификации сельского хозяйства и проведению технической политики в этой области возложены на Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт по электроснабжению объектов сельского хозяйства (ВНИИСельэлектро). В ряде республик проектные работы выполняются Энергосельпроектом, но эти институты не могут обслужить всех сельских потребителей и все районы страны, поэтому, кроме них, проектированием сетей, подстанций и других объектов сельской электрификации занимаются облпроекты, сельхозпроекты, межколхозпроекты и другие проектные организации.

Многие проектные организации поверхностно подходят к выбору источников электроснабжения и схем распределения электроэнергии, продолжая проектировать строительство мелких независимых электростанций без согласования и увязки с энергосистемами.

Чтобы обеспечить проектно-сметной документацией возрастающие объемы по электрификации сельского хозяйства, ВНИИСельэлектро должен перестроить свою работу как по масштабам, так и по технической направленности, удовлетворить полностью потребности в проектных работах сельскохозяйственных объектов страны, направить свою техническую политику на решение задач обеспечения сельских потребителей централизованным электроснабжением от экономичных источников электроэнергии, пользуясь руководящими указаниями по проектированию, утвержденными Министром 3 января 1964 г.

При решении этих вопросов проектным организациям и энергосистемам необходимо особо учесть недостаточное использование имеющихся тяговых подстанций МПС для присоединения к ним сетей сельской электрификации, проверить проектные решения и исправить указанный недостаток. По данным МПС, в настоящее время около 200 мощных тяговых подстанций не используется для электроснабжения сельских и других потребителей.

ВНИИСельэлектро необходимо разработать и утвердить нормативы проектирования жилых домов, мастерских и линейных пунктов, ремонтных баз и других служб для строительства и эксплуатации электрических сетей и подстанций в сельской местности, а также нормативы расхода материалов на 1 млн. руб. строительно-монтажных работ на ЛЭП и дизельных станциях и нормативы материалов на ремонтно-эксплуатационные нужды, нормативы численности эксплуатационного персонала на 1 км электрических линий по напряжениям и другие нормативы.

В проектах должна быть решена необходимая и надежная связь районов сетей и монтерских пунктов с потребителями.

В ближайшие годы значительно возрастут нагрузки в сельском хозяйстве: в связи с мелиорацией, орошением, химизацией должны увеличиться электропотребление и повышение надежности электроснабжения, должно быть организовано электроснабжение удаленных от энергосистем районов за счет строительства стационарных и передвижных электростанций. Учитывая это, ВНИПИсельэлектро должен в короткие сроки совместно с энергосистемами и местными сельхозорганами уточнить схемы электроснабжения каждой области, края и республики для полной электрификации с расчетом обеспечения резервирования электропитания и бесперебойного электроснабжения, а также с внедрением в проектные решения автоматизации и телемеханизации управления, защиты, связи и другой новой техники.

При уточнении областных, краевых и республиканских схем электроснабжения сельского хозяйства необходимо определить объемы предстоящего сетевого строительства, имея в виду при этом проведение работ по реконструкции существующих электросетей, а также кольцевание сетей для двухстороннего питания потребителей, не терпящих перерыва в подаче электроэнергии.

Необходимо приравнять строительство сельских сетей по источникам финансирования к сетям коммунального хозяйства в городах и с 1965 г. осуществлять их финансирование в районах подключения к энергосистемам за счет государственного бюджета с передачей в эксплуатацию организациям Госкомитета вместо существующего порядка, при котором строительство и эксплуатация этих сетей идут за счет колхозов.

Поскольку уже в ближайшие годы электропотребление и электрификация колхозов и совхозов поднимаются до уровня мелких и средних промышленных предприятий в стране, то нужно уточнить разграничение функций по работам, связанным с электрификацией сельского хозяйства между сельхозорганами и предприятиями энергосистем, имея в виду, что все электроснабжение будет осуществляться энергосистемами до ввода в производственные и жилые помещения, а эксплуатация внутри помещений и хозяйств должна осуществляться персоналом колхозов и совхозов. Предприятия энергосистем будут выполнять проектные, монтажные и ремонтные работы по заявкам и договорам с колхозами и совхозами.

Для руководства эксплуатацией и внедрением электроэнергии в сельскохозяйственное производство, по нашему мнению, должны быть организованы службы энергетики в территориальных производственных колхозно-совхозных управлениях, а также в колхозах и совхозах.

Все технологическое оборудование для телемеханизации колхозов и совхозов должно поставляться организациями Сельхозтехники, при этом электромонтажные работы будут проектироваться и выполняться проектными организациями Госкомитета на субподрядных началах с генеральными подрядчиками или непосредственно по договорам с колхозами и совхозами.

Необходимо также рассмотреть вопрос о снижении с 1965 г. стоимости электроэнергии для производственных нужд в сельском хозяйстве до 1 коп/квт·ч вместо 1,9 коп., а также внедрить льготный тариф в часы минимума нагрузок с обеспечением хозяйств двухтарифными электросчетчиками.

Такое решение предусматривает возмещение возможных потерь по стоимости электроэнергии за счет увеличения потребления в часы минимума нагрузок, а также за счет дальнейшего снижения себестоимости электроэнергии в энергосистемах путем их развития и проведения новых организационно-технических мероприятий.

Введение льготного тарифа во всем народном хозяйстве представляет для энергетиков серьезный интерес для выравнивания нагрузок, а в сельском хозяйстве при половинной цене на электроэнергию в часы минимума нагрузок должна быть обеспечена возможность использования электроэнергии на таких важнейших операциях сельскохозяйственного производства, как интенсификация выращивания культур, водоподогрев, орошение, пищеприготовление и другие процессы.

Энергетики Ставропольского края выступили с обращением к энергетикам страны об ускорении электрификации сельского хозяйства. В принятом обязательстве коллектив ставропольских энергетиков решил построить сверх плана 520 км сельских электросетей с подстанциями, завершить присоединение всех колхозов и совхозов в энергосистеме, высвободить не менее 1 500 мелких неэкономичных электростанций, довести потребление электроэнергии сельским хозяйством до 320 млн. квт·ч в 1965 г. против 210 млн. квт·ч в 1963 г., а также завершить приемку от колхозов и совхозов всех сетей, присоединенных к энергосистеме, и выполнить в 1964 г. ремонтные работы по электропроводкам в колхозах и совхозах на сумму 400 тыс. руб. вместо выполненных 100 тыс. руб. в 1963 г.

Коллегия Госкомитета по энергетике и электрификации СССР одобрила инициативу энергетиков Ставропольского края и призвала всех энергетиков-эксплуатационников, а также энергетиков строительно-монтажных и других организаций Госкомитета, его республиканских министерств и главков всемерно поддержать эту инициативу, организовать социалистическое соревнование за досрочное выполнение планов и заданий по бесперебойному электроснабжению и ускорению электрификации сельского хозяйства.

На основе широко развернутого социалистического соревнования коллективов энергетиков страны в текущем году будет сделан новый значительный шаг в развитии электрификации сельского хозяйства, что будет практическим ответом на слова Н. С. Хрущева: «Осуществив электрификацию деревни, мы сделаем большое дело для колхозного крестьянства, для всего народа, для ускорения нашего общего движения на пути к коммунизму!»

[9.3.1964]



# Принципы построения продольной дифференциальной защиты для линий с ответвлениями

Доктор техн. наук, проф. В. Л. ФАБРИКАНТ и инж. Л. А. ОРЕХОВ

Riga

**Введение.** Продольная дифференциальная защита — единственная приемлемая быстродействующая защита для коротких линий электропередачи. Однако применять ее для линий с ответвлениями затруднительно. Между тем таких линий становится все больше. Обычно для них стремятся применить продольные дифференциальные защиты, выпускаемые для двухконцевых линий, дополняя их различными пусковыми органами, которые должны предотвратить неправильное срабатывание защиты при повреждениях за трансформаторами ответвлений.

Однако с увеличением мощности ответвлений, и особенно при наличии с их стороны источников питания, в ряде случаев оказывается, что при удовлетворении пусковыми органами требований селективности невозможно обеспечить их чувствительность при коротких замыканиях в зоне. Кроме того, пусковые органы требуют индивидуального выбора в каждом отдельном случае, их действие зависит от режимов системы, которые со временем меняются, а в ряде случаев уменьшается быстродействие защиты. Поэтому назрела необходимость разработки универсальной продольной защиты для линий с ответвлениями. В данной статье рассматриваются принципы выполнения такой защиты. Условия, которым должна удовлетворять защита, рассматриваются в целях упрощения для многоконцевой линии, для которой линии связи от всех комплектов защиты сходятся в одной точке. Сделанные выводы могут быть распространены на любую конфигурацию линий связи.

**Требования к защите многоконцевой линии выполненной по схеме на циркуляцию токов.** Общий вид схемы защиты на циркуляцию токов показан на рис. 1. На всех концах защищаемой ЛЭП установлены комплекты защиты, в которые вводятся э. д. с.  $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dot{E}_3, \dots, \dot{E}_n$ , пропорциональные токам  $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$  соответствующих концов линии, т. е.

$$\dot{E}_1 = k_1 I_1, \dot{E}_2 = k_2 I_2, \dots, \dot{E}_n = k_n I_n$$

или

$$\dot{E}_m = k_m I_m. \quad (1)$$

Коэффициенты  $k_1, k_2, \dots, k_n$  могут быть в общем случае неодинаковыми. Каждый комплект защиты изображен на рис. 1 четырехполюсником с коэффициентами  $A'_m, B'_m, C'_m, D'_m$ . Выходы этих четырехполюсников соединены линиями связи в общую точку. Участки линий связи от места установки комплектов защиты до общей точки можно в свою очередь заменить четырехполюсниками. Два четырехполюсника — эквивалентный комплекту защиты и эквивалентный соответствующему участку линии связи — соединены последовательно, и их можно заменить одним. Тогда схема примет вид, показанный на рис. 2. Здесь  $A_m, B_m, C_m, D_m$  — коэффици-

енты результирующих четырехполюсников;  $m=1, 2, 3, \dots, n$  — номер четырехполюсника. Для каждого четырехполюсника на рис. 2 можно написать зависимость э. д. с. на входе от напряжения и тока на выходе

$$\dot{E}_m = A_m \dot{U}' + B_m I'_m. \quad (2)$$

Напряжение на выходе  $\dot{U}'$  для всех четырехполюсников общее. Сумма же токов на выходе по первому закону Кирхгофа:

$$I'_1 + I'_2 + I'_3 + \dots + I'_n = 0$$

или

$$\sum_{m=1}^n I'_m = 0. \quad (3)$$

Разделив каждое из уравнений (2) на  $B_m$  и суммируя их от  $m=1$  до  $m=n$  с учетом выражения (3), получим:

$$\sum_{m=1}^n \frac{\dot{E}_m}{B_m} = \dot{U}' \sum_{m=1}^n \frac{A_m}{B_m}. \quad (4)$$

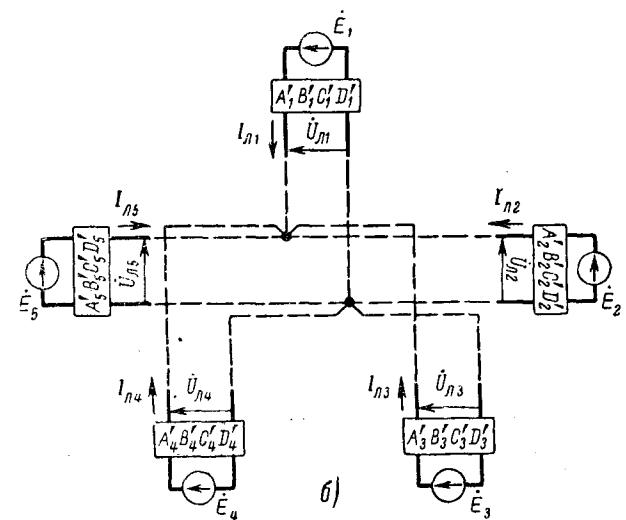
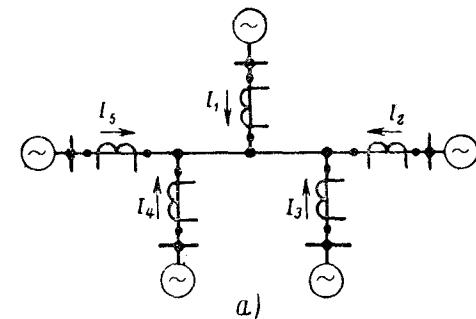


Рис. 1. Продольная дифференциальная защита многоконцевой ЛЭП по схеме на циркуляцию токов.  
а — принципиальная схема защищаемой ЛЭП; б — эквивалентная схема защиты.

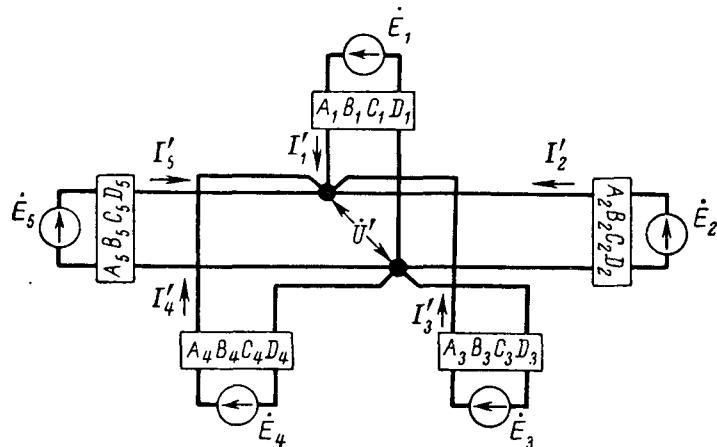


Рис. 2. Преобразование эквивалентной схемы защиты на циркуляцию токов.

Определяя из уравнения (4)  $\dot{U}'$  и подставляя вместо  $\dot{E}_m$  его значение из (1), получим:

$$\dot{U}' = \frac{\sum_{m=1}^n \frac{k_m}{B_m} I_m}{\sum_{m=1}^n \frac{A_m}{B_m}}. \quad (5)$$

Влияние на  $m$ -й (например, первый) комплект защиты всех остальных комплектов осуществляется только через напряжение  $\dot{U}'$ . Если при неизменном значении  $\dot{E}_1$  изменять э. д. с.  $\dot{E}_2, \dot{E}_3$  и т. д. так, чтобы  $\dot{U}'$  не менялось, то поведение первого комплекта защиты не изменится. При внешних коротких замыканиях защита не должна действовать, независимо от соотношения токов  $I_2 \dots I_n$ , которые могут быть различными. Поэтому необходимо, чтобы при неизменном токе  $I_1$  и внешнем коротком замыкании напряжение  $\dot{U}'$  не зависело или мало зависело от соотношения токов  $I_2 \dots I_n$ . При внешнем коротком замыкании, пренебрегая поперечной проводимостью линии электропередачи, что вполне допустимо для коротких линий,

$$I_1 + \sum_{m=2}^n I_m = 0 \text{ или } \sum_{m=2}^n I_m = -I_1. \quad (6)$$

Таким образом, при неизменном токе  $I_1$  неизменной является сумма токов  $\sum_{m=2}^n I_m$ , соотношение же между токами в пределах этой суммы может быть различным. Для того чтобы значение  $\dot{U}'$  при этом не изменилось, оно должно зависеть только от суммы  $\sum_{m=2}^n I_m$ , но не от каждого из этих токов в отдельности. Для этого необходимо и достаточно,

чтобы коэффициенты при  $I_2, I_3$  и т. д. в выражении (5) были равны, т. е.

$$\frac{k_2}{B_2} = \frac{k_3}{B_3} = \dots = \frac{k_m}{B_m} = k.$$

Рассматривая аналогично влияние всех комплектов на второй, придем к выводу о необходимости равенства коэффициентов при токах  $I_1, I_3 \dots I_n$  в выражении (5).

Таким образом, необходимо, чтобы

$$\frac{k_1}{B_1} = \frac{k_2}{B_2} = \frac{k_3}{B_3} = \dots = \frac{k_m}{B_m} = k. \quad (7)$$

Определяя из (7)  $k, k_2 \dots k_m$  и подставляя эти значения в выражения (1) и (5), найдем:

$$\dot{E}_m = k B_m I_m, \quad (8)$$

$$\dot{U}' = \frac{k \sum_{m=1}^n I_m}{\sum_{m=1}^n \frac{A_m}{B_m}}. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что при принятых условиях напряжение  $\dot{U}'$  при внешних коротких замыканиях равно нулю. При коротких замыканиях в зоне оно пропорционально суммарному току короткого замыкания.

Требования к защите многоконцевой линии, выполненной по схеме на равновесие напряжений. Общий вид схемы защиты на равновесие напряжений показан на рис. 3. Она отличается от схемы, изображенной на рис. 1, только последовательным соединением линий связи вместо параллельного. Заменяя, как и в предыдущем случае, каждый комплект защиты вместе с соответствующим участком линии связи четырехполюсником, получаем эквива-

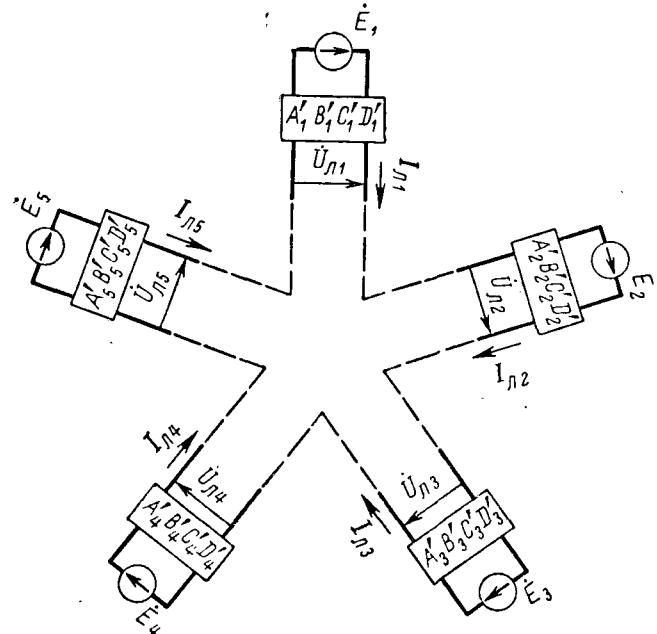


Рис. 3. Эквивалентная схема продольной дифференциальной защиты многоконцевой ЛЭП на равновесие напряжений.

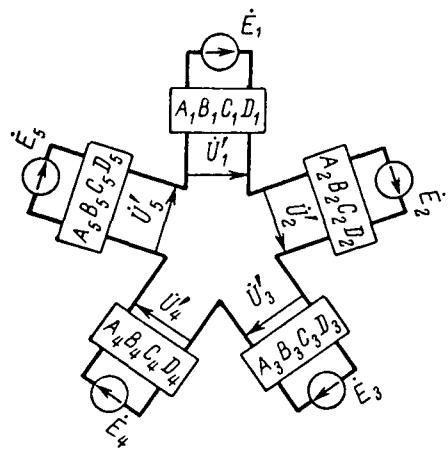


Рис. 4. Преобразование эквивалентной схемы защиты на равновесие напряжений.

лентную схему, показанную на рис. 4. Для каждого из четырехполюсников на рис. 4 можно написать зависимость э. д. с. на входе от напряжения и тока на выходе:

$$\dot{E}_m = A_m \dot{U}'_m + B_m \dot{I}' . \quad (10)$$

В данном случае, как видно из рис. 4, ток на выходе  $\dot{I}'$  одинаков для всех четырехполюсников, а сумма напряжений на выходе их равна нулю, т. е.

$$\sum_{m=1}^n \dot{U}'_m = 0 . \quad (11)$$

Разделив каждое из уравнений (10) на  $A_m$  и суммируя их от  $m=1$  до  $m=n$  с учетом выражения (11), получим:

$$\sum_{m=1}^n \frac{\dot{E}_m}{A_m} = \dot{I}' \sum_{m=1}^n \frac{B_m}{A_m} . \quad (12)$$

Определив из выражения (12)  $\dot{I}'$  и подставив вместо  $\dot{E}_m$  его значение из выражения (1), которое остается в силе и для схемы на равновесие напряжений, получим:

$$\dot{I}' = \frac{\sum_{m=1}^n \frac{k_m}{A_m} I_m}{\sum_{m=1}^n \frac{B_m}{A_m}} . \quad (13)$$

Повторяя рассуждения о влиянии на один из комплектов защиты всех остальных, сделанные для схемы на циркуляцию токов, приходим к выводу о необходимости равенства коэффициентов при токах  $I_m$  в выражении (13), т. е.

$$\frac{k_1}{A_1} = \frac{k_2}{A_2} = \frac{k_3}{A_3} = \dots = \frac{k_m}{A_m} = k . \quad (14)$$

Определив из выражения (14)  $k_1, k_2 \dots k_m$  и подставив эти значения в выражения (1) и (13), получим:

$$\dot{E}_m = k A_m \dot{I}_m , \quad (15)$$

$$\dot{I}' = \frac{k \sum_{m=1}^n I_m}{\sum_{m=1}^n \frac{B_m}{A_m}} . \quad (16)$$

Из выражения (16) следует, что при принятых условиях ток  $\dot{I}'$  равен нулю при внешних коротких замыканиях и пропорционален суммарному току короткого замыкания при повреждениях в зоне.

**Необходимые регулировки.** Как следует из равенств (8) и (15), э. д. с. отдельных комплектов должны быть пропорциональны параметрам  $B$  (для схемы на циркуляцию токов) или параметрам  $A$  (для схемы на равновесие напряжений) соответствующих четырехполюсников. Электродвижущие силы могут быть и одинаковыми, если сделать одинаковыми параметры  $B$  или  $A$ . Для обеспечения равенств (8) и (15) должны быть предусмотрены соответствующие регулировки. Следует отметить, что параметры  $A$  четырехполюсников обычно отличаются друг от друга значительно меньше, чем параметры  $B$ . Поэтому регулировку в схеме на равновесие напряжений, по-видимому, можно выполнить более простой. Однако правильность этого предположения должна быть подтверждена конкретными разработками.

На рис. 5 показана в качестве примера схема, в которой последовательно с линией связи введен регулировочный элемент  $R_1, R_2, C$  для обеспечения заданного, общего для всех комплектов значения параметра  $B$  или  $A$ . Поскольку параметр  $B$  (или  $A$ ) должен иметь заданное комплексное значение, то и суммарное сопротивление должно иметь заданное комплексное значение. Поэтому в элементе предусмотрены две регулировки. Изменением сопротивления  $R_1$  регулируется реактивная составляющая общего сопротивления, после чего сопротивлением  $R_2$  регулируется активная составляющая. На рис. 6 показана область значений результирующего сопротивления при изменении сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  в пределах  $0 \leq R_1 \leq R_{1m}$  и  $0 \leq R_2 \leq R_{2m}$ . Значения  $R_{1m}, R_{2m}$  и  $C$  должны быть выбраны так, чтобы обеспечить достаточную область возможных суммарных сопротивлений при регулировке.

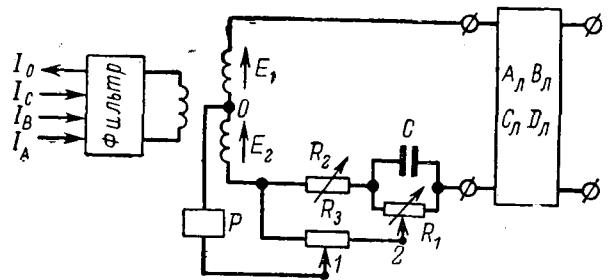


Рис. 5. Принципиальная схема комплекта защиты с регулированием параметров четырехполюсников.

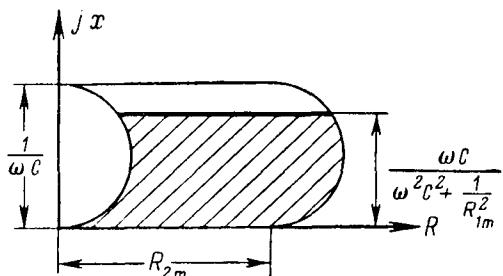


Рис. 6. Диаграмма значений результирующего сопротивления регулировочного элемента  $R_1, R_2, C$  схемы защиты, изображенной на рис. 5.

После удовлетворения равенств (8) и (15) каждый комплект защиты должен регулироваться так, чтобы он не действовал при внешних коротких замыканиях. Как следует из равенств (9) и (16), при внешних коротких замыканиях напряжение (ток) на выходе четырехполюсников должно быть равно нулю. Таким образом, защита не должна действовать при закороченных вторичных зажимах четырехполюсника для схемы на циркуляцию токов и при разомкнутых вторичных зажимах для схемы на равновесие напряжений.

Возможно выполнение схемы по принципу компенсации [Л. 3], т. е., таким образом, чтобы при внешних коротких замыканиях напряжение на рабочей обмотке дифференциального реле было равно нулю. Схема с компенсацией для защиты на циркуляцию токов имеет принципиальный вид, показанный на рис. 7. Составляющие  $E_1$  и  $E_2$  общей э. д. с.  $E_1 + E_2$  и сопротивление компенсации  $Z_k$  должны быть выбраны так, чтобы напряжение  $U_p$  было равно нулю при закороченных внешних зажимах четырехполюсника (для схемы на циркуляцию токов), как показано на рис. 7. При закороченных вторичных зажимах четырехполюсника:

$$\dot{U}_1 = B_L \dot{I}_2 \text{ и } \dot{I}_1 = D_L \dot{I}_2. \quad (17)$$

Для того чтобы  $U_p = 0$ , необходимо и достаточно следующее условие:

$$E_1 = \dot{U}_1 \text{ и } E_2 = I_1 \cdot Z_k. \quad (18)$$

Подставив значения  $\dot{U}_1$  и  $\dot{I}_1$  из (17), находим:

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{B_L}{D_L Z_k}. \quad (19)$$

Выполнение равенства (19) может быть достигнуто регулированием  $Z_k$  или соотношения  $\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2}$ .

В том и другом случае должно быть обеспечено комплексное значение регулируемой величины ( $Z_k$  или  $\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2}$ ), для чего необходимо иметь два регулируемых параметра. При этом регулировка схемы компенсации не должна расстраивать регулировку параметра  $B$  или  $A$  четырехполюсника, описанную выше.

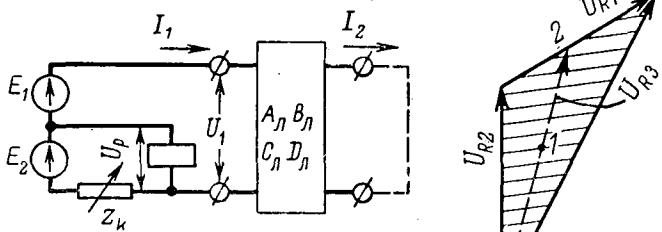


Рис. 7. Принцип компенсации продольной дифференциальной защиты по схеме на циркуляцию токов.

На рис. 5 регулирование схемы компенсации осуществляется перемещением движков 1 и 2. Напряжения на сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$  сдвинуты по фазе (рис. 8). Перемещением движка 2 напряжение  $\dot{U}_{R_3}$  на сопротивлении  $R_3$  изменяется, как показано на рис. 8. Перемещением движка 1 потенциал этого движка перемещается по вектору  $\dot{U}_{R_3}$ . Таким образом, точка 1 на потенциальной диаграмме может перемещаться по всей заштрихованной области. При условии  $\arctg \frac{1}{R_1 \omega C} > -\arg \frac{B_L}{D_L}$  потенциал точки 0 располагается в той же области. Сопротивление  $R_3$  может быть выбрано достаточно большим (мощность достаточно мала), чтобы не оказывать практического влияния на регулирующий элемент  $R_1, R_2, C$  и, следовательно, на параметры  $A, B, C, D$  четырехполюсника, включающего этот регулировочный элемент, линию связи, фильтр и др. Сопротивление  $R_3$  не влияет также практически на распределение потенциалов в сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$ .

Другой возможный вариант схемы с регулировками показан на рис. 9. Здесь регулируется не параметр  $B$  или  $A$  четырехполюсника, а э. д. с., вводимая в схему изменением чисел витков вторичных обмоток. Регулируется отдельно составляющая  $\dot{U}'$ , совпадающая по фазе с первичным напряжением, и составляющая  $\dot{U}''$ , сдвинутая на  $\pi/2$ . Потенциал точки 1 регулируется движками 1 и 2.

Задача может быть выполнена и не по принципу компенсации при достаточном торможении. Принцип компенсации дает значительный эффект при очень длинных линиях связи.

**Порядок наладки защиты.** Прежде всего необходимо добиться выполнения равенств (8) или (15). Параметры четырехполюсника и э. д. с. одного из комплектов принимаются за эталон и по ним регулируются параметры четырехполюсников или

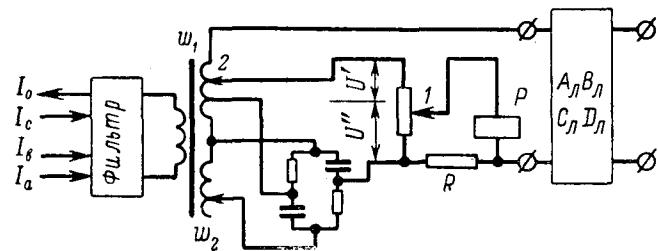


Рис. 9. Принципиальная схема комплекта защиты с регулированием э. д. с., вводимой в схему.

э. д. с. других комплектов. Если принять за эталон комплект защиты подстанции 1, то регулируется комплект подстанции 2, пропуская рабочий ток в направлении подстанция 1 — подстанция 2 при разомкнутых остальных концах линии. При этом контролируется напряжение в месте соединения линий связи (для схемы на циркуляцию токов) или ток в соединительных проводах (для схемы на равновесие напряжений). Комплект на подстанции 2 регулируется (сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  на рис. 5 или витками  $w_1$  и  $w_2$  на рис. 9) так, чтобы контролируемое напряжение или ток были минимальными. После этого ток пропускается в направлении подстанция 1 — подстанция 3 и регулируется комплект защиты подстанции 3 и т. д.

После того как все комплекты отрегулированы на выполнение равенств (8) или (15), можно регулировать элементы компенсации, если таковая имеется. Для этого в месте соединения линий связи они закорачиваются (для схемы на циркуляцию токов) или разрываются (для схемы на равновесие напряжений). После этого элементами регулировки компенсации (движки 1 и 2 на рис. 5 и 9) добиваются минимума напряжения на рабочей обмотке реле. Эта регулировка производится независимо на каждом комплекте. Питание может подаваться и от вспомогательных устройств (без первичного тока).

**Требования к линейности и их реализация.** Применяемые в настоящее время продольные дифференциальные защиты нелинейны, т. е. коэффициент  $k_m$  в выражении (1) непостоянен и уменьшается с увеличением тока. Этим обеспечивается ограничение напряжения на линии связи и релейной аппаратуре при больших токах. Для выполнения условий селективности при внешних коротких замыканиях в случае двухконцевой линии достаточно, чтобы зависимость  $k_m = f(I_m)$  была примерно одинаковой для обоих комплектов. Тогда, поскольку при внешних коротких замыканиях токи обоих концов одинаковы по абсолютному значению, будут одинаковы и коэффициенты  $k_m$  и вводимые э. д. с. Правда, и для двухконцевой линии нелинейность приводит к ухудшению параметров защиты. Защита превращается в дифференциально-фазную при больших токах, да и добиться даже примерной идентичности характеристик  $k_m = f(I_m)$  обычно нелегко. Для многоконцевой же линии значительные отступления от линейности, по-видимому, совершенно недопустимы. При внешних коротких замыканиях токи на разных концах линии, вообще говоря, различны, и даже при полной идентичности характеристик  $k_m = f(I_m)$  для всех концов коэффициенты  $k_m$  окажутся различными и зависящими от распределения тока. Поэтому селективность защиты при внешних коротких замыканиях обеспечить будет невозможно. Таким образом, защита должна выполняться практически линейной (коэффициенты  $k_m$  не зависят от тока). При выполнении защиты линейной возникает следующая основная трудность [Л. 5]. Максимальное значение э. д. с.  $E_m$ , соответствующее максимальным значениям токов, вводимых в комплекты защиты, ограничивается прежде всего допустимым напряжением

для линии связи. В ряде случаев выдвигается требование, чтобы это напряжение (эффективное значение) не превышало  $U_{\text{д}} = 100$  в. Такое требование представляется чрезмерным. Однако значение  $U_{\text{д}} = 220 \div 250$  в, по-видимому, является предельным.

Минимальное значение э. д. с.  $E_m$  определяется требованиями чувствительности. Защита должна действовать при заданных (часто достаточно малых) токах. По условиям линейности э. д. с. при этом будут снижаться пропорционально току. Если ток срабатывания меньше максимального в  $n_k$  раз, то и э. д. с., достаточная для срабатывания, должна быть меньше максимальной в  $n_k$  раз.

Современные защиты могут быть выполнены довольно чувствительными, т. е. реагирующими на весьма малые значения э. д. с. и напряжения на линии. Но такие чувствительные защиты могут действовать неправильно под влиянием наведенных э. д. с. при некоторой несимметрии линии связи. Если последняя расположена поблизости от линий электропередачи (что обычно бывает), в ее проводах наводятся продольные э. д. с.  $E_{\text{нав}}$ , которые увеличиваются при протекании по линиям токов короткого замыкания, особенно содержащих нулевую последовательность. Вызываемые продольными э. д. с. токи замыкаются через емкости между каждым из проводов линии связи и землей (рис. 10). При полной симметрии этих емкостей потенциалы обоих проводов линии связи на любом конце одинаковы и напряжение на комплекте защиты или ток через этот комплект не возникает. Однако при полном или частичном заземлении одного из проводов линии связи возникает несимметрия. При этом потенциалы заземленного и незаземленного проводов оказываются различными. На комплектах защиты появляется напряжение (поперечное напряжение), и через них протекают токи. Возникает режим, подобный повреждению в зоне при одностороннем питании, когда в один из комплектов защиты вводится э. д. с.

В существующих защитах обычно имеется контроль замыкания линии связи на землю, действующий на сигнал. Предполагается, что до вывода защиты из действия (автоматически или персоналом по сигналу этого контроля) не произойдет внешнего короткого замыкания, сопровождающегося значениями наведенных э. д. с., способных привести к неселективному действию защиты. При этом могут возникать поперечные напряжения, вызываемые лишь несимметрией, не обнаруживаемой контролем вследствие его недостаточной чувствительности. От

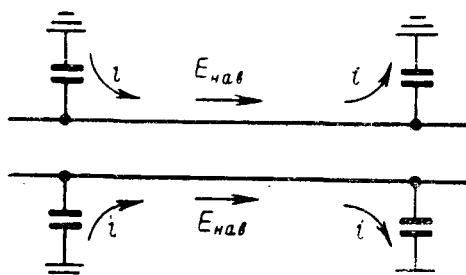


Рис. 10. Емкостные токи незаземленной линии связи при наличии наведенных э. д. с.

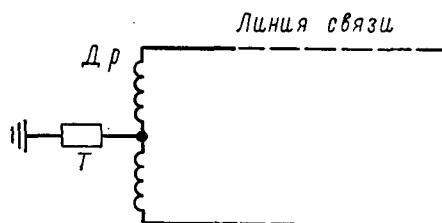


Рис. 11. Принцип выполнения дополнительного торможения по сумме потенциалов проводов линии связи относительно земли.

*Др* — дроссель; *T* — тормозная обмотка дифференциального реле.

таких напряжений защита обычно отстраивается. Защита должна быть отстроена и от поперечных напряжений, вызванных продольными э. д. с., наведенными токами нагрузки, даже при металлическом заземлении одного из проводов. Уже такая отстройка защиты увеличивает допустимое напряжение между проводами при срабатывании, которое должно быть обеспечено при токах срабатывания. Одновременно при условиях линейности возрастает и максимальное напряжение, соответствующее максимальному значению тока, которое может превзойти допустимую величину.

Повышение чувствительности контроля не предотвращает срабатывания защиты при несимметрии и токах нагрузки. Кроме того, такое повышение чувствительности нежелательно, так как приведет к ненужному выведению защиты из действия при снижении изоляции линии связи. Для предотвращения неселективного действия защиты необходимо как-то отличать режим, при котором в одном из комплектов защиты появляется э. д. с., от режима, когда поперечное напряжение создается наведенными э. д. с. и несимметрией линии. В качестве такого отличающего признака может быть принята сумма потенциалов проводов по отношению к земле или разность абсолютных значений этих потенциалов. Обе эти величины равны нулю при возникновении э. д. с. в комплекте защиты и отсутствии наведенных э. д. с. и несимметрии линии. Первая из них (сумма потенциалов) возникает при наличии наведенных э. д. с. даже без несимметрии линии. Вторая (разность абсолютных значений) возникает только при наличии несимметрии. Давая дополнительное торможение органам защиты от одной из этих величин, можно предотвратить их неселективное действие, не загрублняя защиту в обычных

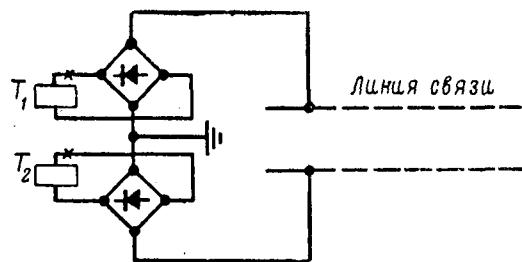


Рис. 12. Принцип выполнения дополнительного торможения по разности абсолютных значений потенциалов проводов линии связи относительно земли.

*T<sub>1</sub>* и *T<sub>2</sub>* — тормозные обмотки дифференциального реле.

условиях. Возможное осуществление торможения показано на рис. 11 и 12. Выполнение торможения от разности абсолютных значений потенциалов (рис. 12) несколько сложнее, но, по-видимому, имеет некоторые параметрические преимущества — отсутствие дополнительного торможения при повреждении в зоне и наведенных э. д. с. при симметрии линии связи.

**Контроль линий связи многоконцевой линии.** Принципы контроля для схемы на циркуляцию токов и для схемы на равновесие напряжений показаны на рис. 13 и 14. Если защита может действовать при повреждении линий связи в рабочем режиме (высокочувствительные защиты), контроль должен действовать на быстрый вывод защиты на всех концах линии. В этом случае устройства контроля должны устанавливаться на всех концах и обладать быстрым действием. Если же защита отстроена от действия в рабочем режиме при повреждении линий связи, устройство может действовать только на сигнал и его достаточно установить на одном конце. В первом случае наиболее выгодное решение для схемы на циркуляцию токов (рис. 13) может получиться при следующем соотношении сопротивлений на питающем конце *R<sub>пит</sub>* и приемных концах *R<sub>пр</sub>*:

$$R_{\text{пр}} = R_{\text{пит}} \sqrt{(n-1)(n-2)}, \quad (20)$$

где *n* — число концов многоконцевой линии.

При этом обрыв проводов одного из приемных концов приводит к уменьшению тока контроля на питающем конце и увеличению его на каждом из приемных, кроме конца, где произошел обрыв, в  $\sqrt{\frac{n-1}{n-2}}$  раз.

Для трехконцевой линии  $R_{\text{пр}} = R_{\text{пит}} \sqrt{2}$  и изменение тока проходит в  $\sqrt{2}$  раз.

Для схемы на равновесие напряжений (рис. 14) сопротивление на стороне питания следует сделать возможно меньшим. При металлическом замыкании проводов на одном из приемных концов ток контроля при этом возрастает на всех остальных концах в  $\frac{n-1}{n-2}$  раз. Это изменение больше, чем в схеме на циркуляцию токов. Для трехконцевой линии ток контроля увеличивается в 2 раза. Контроль на всех приемных концах в обоих случаях

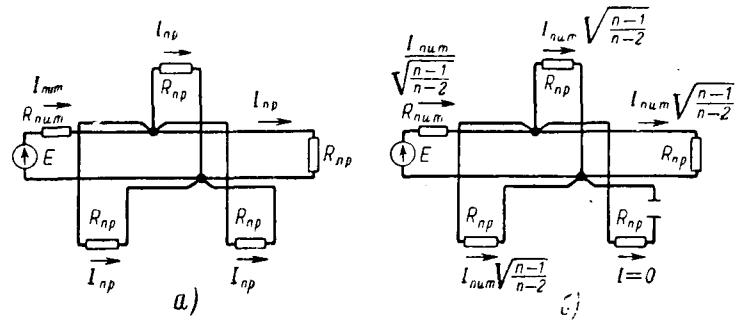


Рис. 13. Распределение токов в схеме контроля линии связи для защиты на циркуляцию токов.  
а — в нормальных условиях; б — при обрыве проводов одного из приемных концов.

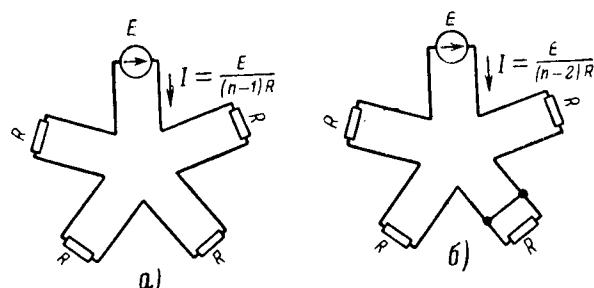


Рис. 14. Распределение токов в схеме контроля линии связи для защиты на равновесие напряжений.  
а — в нормальных условиях; б — при замыкании проводов одного из приемных концов.

должен реагировать как на увеличение, так и на уменьшение тока.

В случае действия контроля на сигнал комплекта контроля можно установить либо на питающем конце, либо на всех приемных. При установке на питающем конце для обеих схем (на циркуляцию токов и равновесие напряжений) сопротивление на питающем конце должно быть возможно малым. При этом обрывы на любом из приемных концов в схеме на циркуляцию токов или металлическое замыкание в схеме на равновесие напряжений приводят к изменению тока в  $\frac{n-1}{n-2}$  раз. Установка на всех приемных концах требует большего числа комплектов, но обеспечивает большую чувствительность. При этом сигнал получается от комплекта контроля поврежденного конца.

**Выводы.** 1. Селективная продольная дифференциальная защита многоконцевой линии возможна. Для ее осуществления требуется такая регулировка всех комплектов защиты, чтобы обеспечивалось условие (8) для схемы на циркуляцию токов или (15) для схемы на равновесие напряжений.

2. Комплекты защиты должны выполняться с линейной зависимостью вводимых э. д. с. от токов линии. При этом они должны реагировать на малые значения поперечных напряжений. Для отстройки от наведенных э. д. с. и несимметрии линий связи должно быть применено специальное торможение.

3. По условию взаимной регулировки комплектов и по выполнению контроля, действующего на мгновенный вывод защиты, схема на равновесие напряжений, по-видимому, несколько лучше схемы на циркуляцию токов.

#### Литература

1. Фабрикант В. Л., Анализ продольных дифференциальных защт линий методом диаграмм в комплексной плоскости, «Электричество», 1960, № 12.

2. Neher J. H., A new approach to the pilot-wire protection of transmission lines using leased pilot-wires having relatively long electrical characteristics, AIEE Transactions, 1960.

3. Kimball E. W., Power system stability, v. 2, 1950.

4. Гендриксон и Кэррэз, Защита вспомогательных проводов продольной дифференциальной защиты с помощью дренажных катушек, Энергетика за рубежом, Релейная защита, вып. 3, Госэнергоиздат, 1960.

5. Руководящие указания по накладке, проверке и эксплуатации продольной дифференциальной защиты линий типа ДЗЛ-1, Госэнергоиздат, 1962.

[12.8.1963]



УДК 621.316.11

## Исследование сложных несимметричных эксплуатационных режимов работы сетей на расчетной модели постоянного тока с применением обобщенных параметров

Л. М. ВАЙНШТЕЙН и Н. А. МЕЛЬНИКОВ

Москва

Одной из особенностей схем замещения электрических систем является практическая возможность их линеаризации, поскольку почти все параметры элементов самой системы можно считать постоянными. Нелинейной получается только часть схемы, состоящая из некоторых поперечных ветвей, главным образом из нагрузок. Поэтому целесообразно применять итерационные методы расчета в токах, особенно если речь идет о несимметричных режимах. Тогда в пределах каждой итерации задача получается линейной, и решение ее значительно упрощается. Все это дает возможность при расчете режимов работы электрических систем воспользоваться статическими моделями переменного и постоянного тока, что в настоящее время является немаловажным, поскольку электронные

цифровые вычислительные машины еще не получили достаточно широкого распространения.

Кроме того, статические модели, как известно, обладают рядом достоинств, которые нельзя недооценивать: сравнительная простота получения приближенных результатов, возможность быстрого изменения исходных условий, исключение необходимости промежуточных вычислений, легкость непосредственной проверки влияния изменения того или иного параметра, удобство применения (в случае необходимости) метода итераций и т. д.

Применение обобщенных параметров открывает новые возможности использования статических моделей и, в частности, моделей постоянного тока, и значительно расширяет круг задач, которые можно решать с их помощью. В данной статье рассмат-

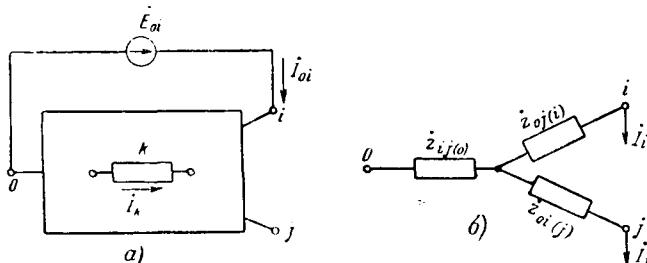


Рис. 1.

ривается только одна задача — расчет сложных эксплуатационных несимметричных режимов электрических систем.

Для того чтобы решение с помощью итерационных методов было эффективным, необходимо, чтобы итерационный процесс при решении практических задач сходился достаточно быстро. С точки зрения ускорения итерационного процесса важно, чтобы первое приближенное решение давало по возможности более правильное решение. Применительно к схемам замещения электрических систем это требование сравнительно легко удовлетворяется.

Если нелинейную часть схемы (поперечные ветви) представить в виде задающих токов, то величины последних будут определяться напряжением в местах их приложения. А как известно, напряжения в электрической системе сравнительно мало различаются между собой по величине и фазе. Поэтому задающие токи, найденные по первым предположительным значениям напряжений, обычно сразу получаются довольно близкими к действительным (если углы сдвига по фазе сравнительно невелики). Следовательно, и первая поправка в значениях напряжений, определяемая по этим токам, даст хорошее приближение к исключому результату. Таким образом, здесь обычно обеспечивается достаточно быстрая сходимость.

В статье Л. М. Вайнштейна и Н. А. Мельникова «Расчет сложных несимметричных режимов работы электрических систем с помощью модели постоянного тока»<sup>1</sup> был показан один из методов учета задающих токов при расчетах сложных несимметричных режимов с помощью итераций. Этот метод заключается в замене действия задающих токов действием э. д. с. Для этого в каждом приближении производится распределение всех задающих токов в схеме и определяются падения напряжения на соответствующих сопротивлениях, включая и сопротивления взаимной индукции.

Подобные расчеты для сложных схем оказываются достаточно трудоемкими.

В этих условиях представляется целесообразным использовать для расчета обобщенные параметры схем в виде эквивалентных сопротивлений. Их применение существенно сократит и облегчит расчеты итерационного процесса.

Определение обобщенных параметров можно представить следующим образом.

Один из узлов схемы, например 0, принимается в качестве пункта баланса задающих токов.

В исходной схеме замещения (пассивной, без источников э. д. с. и источников тока) предполагается включение дополнительной э. д. с.  $\dot{E}_{ij}$  между соответствующими точками  $i$  и  $j$ . Тогда, очевидно, входное сопротивление схемы  $z_{ij}$  между этими точками равно:

$$\dot{z}_{ij} = \frac{\dot{E}_{ij}}{I_{ij}},$$

где  $I_{ij}$  — ток, вызванный э. д. с.  $\dot{E}_{ij}$ .

Зная входные сопротивления, можно определить и эквивалентные сопротивления схемы:

$$\dot{z}_{ij(0)} = \frac{1}{2} (\dot{z}_{oi} + \dot{z}_{oj} - \dot{z}_{ij}),$$

где  $\dot{z}_{oi}$ ,  $\dot{z}_{oj}$  — входные сопротивления между точкой баланса 0 и соответственно точками  $i$ ,  $j$ ;

$\dot{z}_{ij}$  — входное сопротивление между точками  $i$  и  $j$ ;

$\dot{z}_{ij(0)}$  — эквивалентное (общее) сопротивление для точек  $i$ ,  $j$  относительно точки баланса 0.

Входное сопротивление  $\dot{z}_{oi}$  ( $\dot{z}_{oj}$ ) определяет изменение напряжения в точке  $i$  ( $j$ ) относительно точки 0 при изменении задающего тока в этой же точке  $i$  ( $j$ ) (см. схему для определения  $\dot{z}_{oi}$  на рис. 1, а).

Эквивалентное сопротивление  $\dot{z}_{ij(0)}$  является сопротивлением луча эквивалентной трехлучевой звезды, примыкающего в точке 0. Оно определяет изменение напряжения в точке  $i$  ( $j$ ) относительно точки 0 при изменении задающего тока в другой точке  $j$  ( $i$ ).

Действительно, при  $I_i = 0$  напряжение в точке  $i$  относительно точки 0 будет определяться произведением (рис. 1, б):

$$\dot{U}_i |_{\dot{U}_o=0} = I_j \dot{z}_{ij(0)}.$$

Таким образом, суммарное изменение напряжения в точке  $i$  относительно напряжения в точке 0 при изменении задающих токов в точках  $i$  и  $j$  будет:

$$\Delta \dot{U}_i = \sqrt{3} \left( \dot{I}_i \dot{z}_{oi} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \dot{I}_j \dot{z}_{ij(0)} \right)$$

и

$$\dot{U}_i = \dot{U}_o - \Delta \dot{U}_i,$$

где  $\dot{I}_i$ ,  $\dot{I}_j$  — задающие токи соответственно в точках  $i$ ,  $j$ ;

$\dot{U}_o$  — напряжение в точке 0;

$\dot{U}_i$  — напряжение в точке  $i$ .

Коэффициент распределения  $c_{ik}$  тока в какой-нибудь ветви  $k$  схемы может быть определен, как отношение тока  $\dot{I}_k$  в этой ветви к току  $\dot{I}_{oi}$  в ветви с дополнительной э. д. с.  $\dot{E}_{oi}$  (рис. 1, а):

$$c_{ik} = \frac{\dot{I}_k}{\dot{I}_{oi}}.$$

<sup>1</sup> См. «Электричество», 1963, № 9.

Однако, если речь идет о расчетах сложных несимметричных эксплуатационных режимов работы электрических систем, то в общем случае непосредственное определение всех обобщенных параметров по исходной схеме замещения в соответствии с приведенными формулами весьма затруднено.

Дополнительные трудности возникают при расчетах режимов работы по схеме замещения, содержащей элементы взаимной индуктивности.

В таких случаях целесообразно воспользоваться принципом дуальности (см. упомянутую выше статью).

Применение этого принципа дает возможность перейти от расчета исходной схемы с взаимными индуктивностями к расчету дуальной схемы, не содержащей элементов взаимной индуктивности.

Рассмотрение полной исходной схемы замещения (в трехфазном изображении) позволяет при этом легко учесть несимметрию, не прибегая к методу симметричных составляющих.

Как известно, источник э. д. с., включаемый в исходной схеме для определения входных сопротивлений и коэффициентов распределения, на дуальной схеме представляется в виде источника тока или, иначе говоря, в виде пары задающих токов.

Примем условно, что в общем случае включение этой дополнительной э. д. с. создает в исходной схеме дополнительный контур. Тогда в соответствии со свойством дуальности проводимость, измеренная между точками включения источника тока (между точками приложения пары токов) в дуальной схеме, численно равна входному сопротивлению между соответствующими точками исходной схемы.

Если в дуальной схеме напряжение между точками включения источника тока (пары токов) равно единице, то напряжения узловых точек относительно точки 0 будут численно равны контурным токам исходной схемы волях от тока, коэффициенты распределения которого определяются.

Токи в ветвях исходной схемы (их комплексные значения) и будут являться искомыми коэффициентами распределения.

В случаях, когда имеется в виду расчеты по дуальным схемам производить на расчетной модели постоянного тока, к этим схемам предъявляется дополнительное требование: схема должна быть однородной и все параметры ее элементов должны быть одного знака.

В частности, в целях упрощения желательно, чтобы схема не содержала отрицательных активных сопротивлений.

Если в дуальной схеме избежать появления сопротивлений разных знаков не удается, то, когда число их сравнительно мало, можно применить следующий прием. Смысл этого приема будет ясен из примера схемы, содержащей только реактивные сопротивления с одним сопротивлением  $x'$  отличного знака, включенным к узлам  $k$  и  $l$ , рис. 2, а.

Сначала рассматривается схема без этого сопротивления, и на модели постоянного тока опреде-

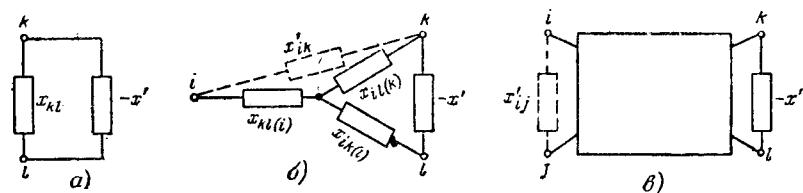


Рис. 2.

ляются все входные сопротивления<sup>2</sup>. Затем подсчитываются входные сопротивления с учетом ветви  $x'$ . При этом могут быть следующие три характерных случая.

Если определяется входное сопротивление между узлами  $k$  и  $l$  (рис. 2, а), то

$$x'_{kl} = \frac{x_{kl} \cdot (-x')}{x_{kl} - x'} = \frac{x' \cdot x_{kl}}{x' - x_{kl}} \dots \quad (1)$$

Если определяется входное сопротивление между любыми из узлов  $k$  или  $l$  и некоторым другим узлом  $i$  ( $k \neq i \neq l$ ), как это показано на рис. 2, б, то

$$x'_{ik} = x_{kl}(i) + \frac{x_{il}(k)(x_{ik}(i) - x')}{x_{kl} - x'} \dots \quad (2)$$

И, наконец, если определяется входное сопротивление между любой парой узлов  $i$  и  $j$  ( $k \neq i \neq l$  и  $k \neq j \neq l$ ) в соответствии с рис. 2, в, то

$$x'_{ij} = x_{ij} - \frac{(x_{ik} - x_{jk} - x_{il} + x_{jl})^2}{x_{kl} - x'} \dots \quad (3)$$

В этих формулах сопротивления с индексом штрих относятся к схеме с  $x'$ , а сопротивления без этого индекса — к схеме без ветви  $x'$ .

Естественно, что этими формулами можно пользоваться, присоединяя к схеме одно за другим любое число сопротивлений.

В случае, когда для подсчета коэффициентов распределения напряжений в дуальной схеме (для нахождения коэффициентов распределения токов в исходной схеме) непосредственные замеры токов-распределения на модели постоянного тока осуществить невозможно из-за наличия сопротивлений разных знаков, то можно воспользоваться указанным выше путем: сначала определить все входные сопротивления, а затем аналитически подсчитать коэффициенты распределения напряжений:

$$\dot{D}'_{ij} = \left( \frac{\dot{U}'_{0i}}{\dot{U}'_{0j}} \right)_{j_i=0} = \frac{\dot{z}'_{ij}(0)}{\dot{z}'_{0j}} \dots, \quad (4)$$

где  $\dot{U}'_{0i}$ ,  $\dot{U}'_{0j}$  — напряжения в точках  $i$  и  $j$  относительно точки 0 дуальной схемы, если источник тока включен между точками 0 и  $j$ .

Таким образом, появляется реальная возможность определения обобщенных параметров схем с помощью расчетной модели постоянного тока, даже в случае наличия в схеме сопротивлений разных знаков.

<sup>2</sup> Здесь рассматривается дуальная схема, поэтому в исходной схеме входные сопротивления будут равны  $\frac{1}{jx_{\text{дуал}}}$ .

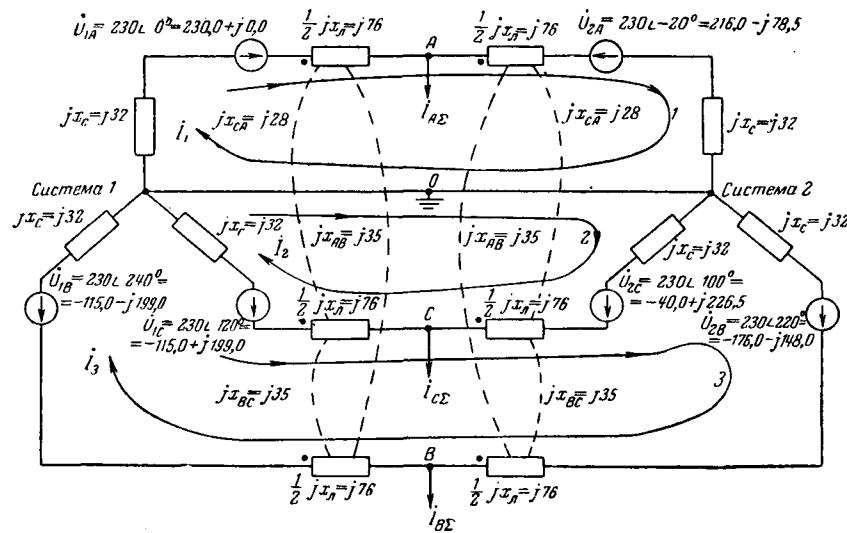


Рис. 3.

**Пример 3.** Рассматривается расчет режима линии электропередачи с номинальным напряжением 400 кв, связывающей две системы (систему 1 и систему 2) одинаковой мощности. Длина линии 300 км.

Линия нетранспонирована и выполнена с расщепленными проводами с горизонтальным расположением фаз на опорах (фазы А и С — крайние, фаза В — средняя).

Таким образом, параметры фаз цепи различные.

Предполагается, что энергия передается из системы 1 в систему 2. По обоим концам линии поддерживается одинаковая симметричная система напряжений  $230\sqrt{3}=400$  кв. Система напряжений у передающего конца линии на  $20^\circ$  опережает систему напряжений у приемного конца. Эквивалентные реактансы обоих систем приняты в соответствии с заданными значениями мощности короткого замыкания 5 000 мвт:  $x_c=32$  ом.

Значения параметров линии электропередачи приведены в табл. 1. Вся линия рассматривается как один участок и представляется Т-образной схемой замещения.

Таблица 1

Наименование параметров	Обозначение	Значения на	
		1 км	300 км
Собственное сопротивление фазы линии, ом	$r_L + jx_L$	$0,02 + j0,507$	$6 + j152$
Взаимное индуктивное сопротивление между фазами А—В и В—С, ом	$x_{AB} = x_{BC}$	$j0,233$	$j70$
Взаимное индуктивное сопротивление между фазами С—А, ом	$x_{CA}$	$j0,186$	$j56$
Емкостная проводимость на землю для фаз А и С, $1/\text{ом}$	$y_A = y_C$	$j3,36 \cdot 10^{-6}$	$j10,1 \cdot 10^{-4}$
Емкостная проводимость на землю фазы В, $1/\text{ом}$	$y_B$	$j3,75 \cdot 10^{-6}$	$j11,2 \cdot 10^{-4}$
Емкостная проводимость между фазами А—В и В—С, $1/\text{ом}$	$y_{AB} = y_{BC}$	$j0,49 \cdot 10^{-6}$	$j1,5 \cdot 10^{-4}$
Емкостная проводимость между фазами С—А, $1/\text{ом}$	$y_{CA}$	$j0,39 \cdot 10^{-6}$	$j1,2 \cdot 10^{-4}$

<sup>3</sup> Такой же пример рассмотрен в статье Л. М. Вайнштейна и Н. А. Мельникова в журнале «Электричество», 1963, № 9.

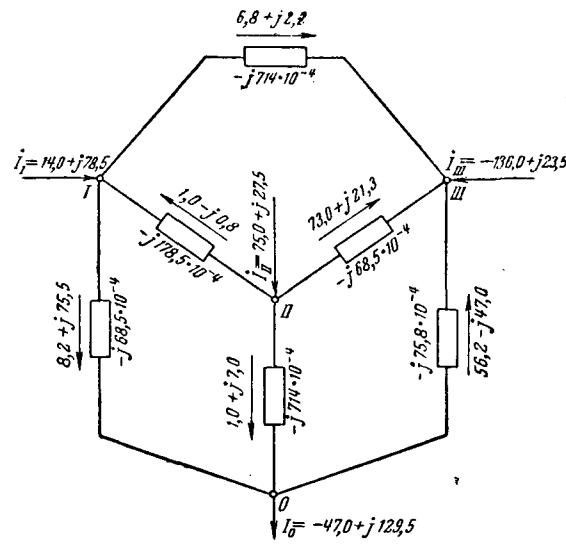


Рис. 4.

В связи с тем, что расчет выполняется с использованием модели постоянного тока, активными сопротивлениями фаз линии пренебрегаем. Кроме того, в целях упрощения решения все емкостные проводимости цепи в процессе расчета заменяются соответствующими им задающими токами.

Дополнительно вводим следующие обозначения:

$$x_c + \frac{1}{2}x_L = 32 + \frac{1}{2}152 = 108 = x_{AA} = x_{BB} = x_{CC}$$

— собственные сопротивления фаз.

При принятых условиях схема замещения имеет вид, представленный на рис. 3, из которого, в частности, видно, что аргумент комплексного выражения напряжения фазы А системы 1 ( $\dot{U}_{1A}$ ) принят равным нулю.

На схеме показаны принятые положительные направления задающих токов ( $I_{A\Sigma}, I_{B\Sigma}, I_{C\Sigma}$ ), обусловленных емкостными проводимостями.

Поскольку значение емкостных токов зависит от соответствующих напряжений по середине линии, а эти последние, в свою очередь, зависят от емкостных токов, расчет выполняется методом итераций.

В данном случае целесообразно решение произвести в два этапа: сначала определить режим в предположении отсутствия задающих (емкостных) токов, а затем произвести учет влияния задающих токов с использованием обобщенных параметров схемы. Искомый режим получается как результат наложения этих двух режимов.

Расчет режима без учета задающих токов выполняется с помощью дуальной схемы. Принятые независимые контуры и положительные направления их обхода при составлении дуальной схемы показаны на рис. 3.

Проводимости и сопротивления элементов дуальной схемы (для исходной схемы рис. 3) даны в табл. 2. Эта таблица

Таблица 2

	0	I	II	III
0	—	$-j68,5 \cdot 10^{-4}$	$-j714 \cdot 10^{-4}$	$-j75,8 \cdot 10^{-4}$
I	$j146$	—	$-j178,5 \cdot 10^{-4}$	$-j714 \cdot 10^{-4}$
II	$j14$	$j56$	—	$-j68,5 \cdot 10^{-4}$
III	$j132$	$j14$	$j146$	—

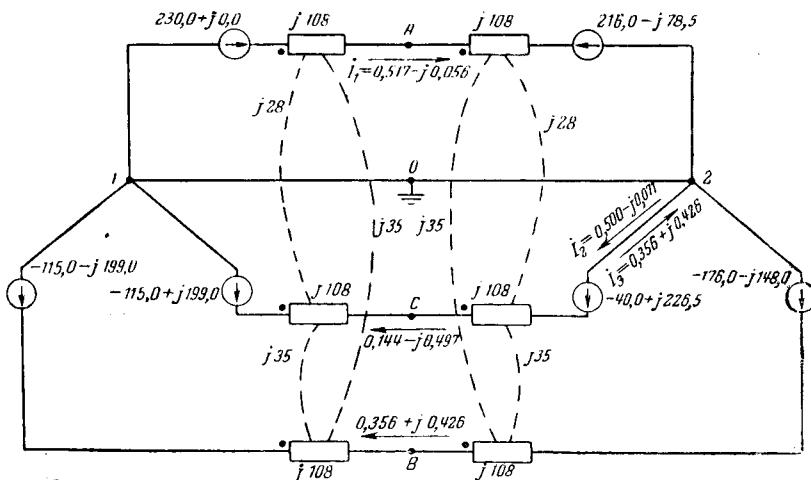


Рис. 5.

составлена так, что ниже главной диагонали указаны проводимости ( $\frac{1}{\text{ом}}$ ), а выше — сопротивления (ом). Сопротивления и проводимости расположены так, что они находятся в клетках, определяемых пересечением вертикальных и горизонтальных строк с соответствующими индексами.

Дуальная схема с параметрами табл. 2 представлена на рис. 4.

Задающие токи, которые должны быть приложены в узлах дуальной схемы, равны:

$$I_1 = \dot{U}_{1A} - \dot{U}_{2A} = 14,0 + j78,5;$$

$$I_{II} = -\dot{U}_{1C} + \dot{U}_{2C} = 75,0 + j27,5;$$

$$I_{III} = \dot{U}_{1C} - \dot{U}_{2C} + \dot{U}_{2B} - \dot{U}_{1B} = -136,0 + j23,5.$$

После предварительного изменения масштаба сопротивлений (принят масштабный коэффициент  $m_z = j10^4$ ) эта дуальная схема набирается на модели постоянного тока.

Решение выполняется методом наложения путем измерения относительного токораспределения (за пункт баланса принятая точка 0).

Полученное непосредственными замерами токораспределение было подвергнуто проверке и незначительной корректировке по уравнениям состояния. Уточненное токораспределение нанесено на схеме рис. 4.

Зная токораспределение в дуальной схеме, подсчитываем узловые напряжения в ней относительно точки 0, численно равные соответствующим токам исходной схемы

$$\dot{U}_1 = 0,517 - j0,056 = I_1; \quad \dot{U}_{II} = 0,500 - j0,071 = I_2;$$

$$I_{III} = 0,356 + j0,426 = I_3.$$

Токораспределение в исходной схеме без учета задающих токов дано на рис. 5.

Далее переходим к определению с помощью дуальных схем обобщенных параметров и коэффициентов распределения

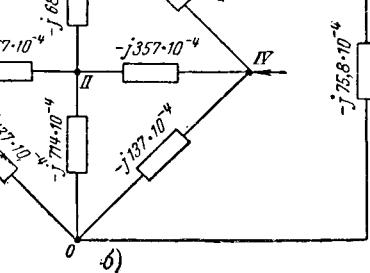
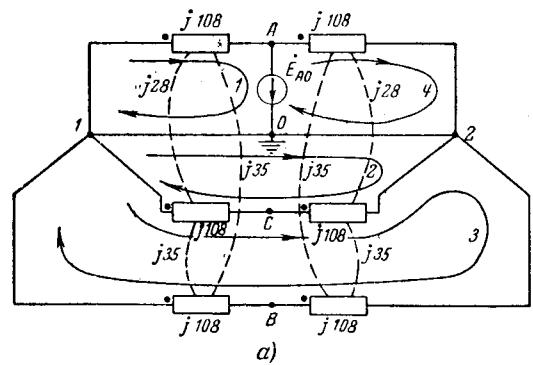


Рис. 6.

задающих токов в точках А, В, С, считая за точку баланса нейтраль 0 исходной схемы.

Составленные для этой цели исходные схемы (а) и соответствующие им дуальные схемы (б) представлены на рис. 6, 7, 8, 9.

Проводимости ( $\frac{1}{\text{ом}}$ ) и сопротивления (ом) элементов дуальных схем даны соответственно в табл. 3, 4, 5, 6.

Таблица 4

	0	I	II	III	IV
0	—	$-j 68,5 \cdot 10^{-4}$	$-j 714 \cdot 10^{-4}$	$-j 151,5 \cdot 10^{-4}$	$-j 151,5 \cdot 10^{-4}$
I	$j 146$	—	$-j 178,5 \cdot 10^{-4}$	$-j 1429 \cdot 10^{-4}$	$-j 1429 \cdot 10^{-4}$
II	$j 14$	$j 56$	—	$-j 137 \cdot 10^{-4}$	$-j 137 \cdot 10^{-4}$
III	$j 66$	$j 7$	$j 73$	—	$\infty$
IV	$j 66$	$j 7$	$j 73$	0	—

Таблица 3

	0	I	II	III	IV
0	—	$-j 137 \cdot 10^{-4}$	$-j 714 \cdot 10^{-4}$	$-j 75,8 \cdot 10^{-4}$	$-j 137 \cdot 10^{-4}$
I	$j 73$	—	$-j 357 \cdot 10^{-4}$	$-j 1429 \cdot 10^{-4}$	$\infty$
II	$j 14$	$j 28$	—	$-j 68,5 \cdot 10^{-4}$	$-j 357 \cdot 10^{-4}$
III	$j 132$	$j 7$	$j 146$	—	$-j 1429 \cdot 10^{-4}$
IV	$j 73$	0	$j 28$	$j 7$	—

Таблица 5

	0	I	II	III	IV
0	—	$-j 125 \cdot 10^{-4}$	$\infty$	$-j 125 \cdot 10^{-4}$	$\infty$
I	$j 80$	—	$-j 143 \cdot 10^{-4}$	$+j 714 \cdot 10^{-4}$	$-j 125 \cdot 10^{-4}$
II	0	$j 70$	—	$-j 68,5 \cdot 10^{-4}$	$\infty$
III	$j 80$	$-j 14$	$j 146$	—	$-j 125 \cdot 10^{-4}$
IV	0	$j 80$	0	$j 80$	—

Таблица 6

	0	I	II	III	IV
0	—	$-j 62,5 \cdot 10^{-4}$	$-j 62,5 \cdot 10^{-4}$	$\infty$	$\infty$
I	$j 160$	—	$+j 714 \cdot 10^{-4}$	$-j 286 \cdot 10^{-4}$	$-j 286 \cdot 10^{-4}$
II	$j 160$	$-j 14$	—	$-j 137 \cdot 10^{-4}$	$-j 137 \cdot 10^{-4}$
III	0	$j 35$	$j 73$	—	$\infty$
IV	0	$j 35$	$j 73$	0	—

Эти таблицы составлены аналогично табл. 2.

В связи с тем, что в данном случае фазы А и С линии расположены симметрично относительно фазы В, результаты расчетов для фазы А могут быть использованы для фазы С; кроме того,  $z_{BC} = z_{AB}$ .

Дуальные схемы рис. 6,б и 7,б набираются на модели постоянного тока.

Непосредственными замерами по схеме рис. 6,б получаем значение проводимости между точками I и IV, численно равное искомому входному сопротивлению:  $z_{A0} = j53,6 \text{ ом}$ .

При напряжении между точками I и IV дуальной схемы (в соответствии с направлением задающих токов в этих точках), принятом за 100%, напряжения узловых точек относительно точки 0 оказываются равными:

$$U_{I-0} = +49,9 \approx 50\%; \quad U_{IV-0} = -49,9 \approx -50\%; \\ U_{II-0} = 0; \quad U_{III-0} = 0.$$

Используя свойство дуальных схем, в соответствии со схемой рис. 6,а, получаем, что для тока  $I_{A\Delta}$  коэффициент распределения для ветви 1—А равен 0,5, а для ветви А—2 он равен -0,5 (с учетом принятых положительных направлений токов в этих ветвях). Для остальных ветвей коэффициенты распределения тока  $I_{A\Delta}$  равны нулю.

Непосредственными замерами по схеме рис. 7,б находим проводимость между точками III и IV. Она равна  $j72,4$ . Таким образом,  $z_{BC} = j72,4 \text{ ом}$ .

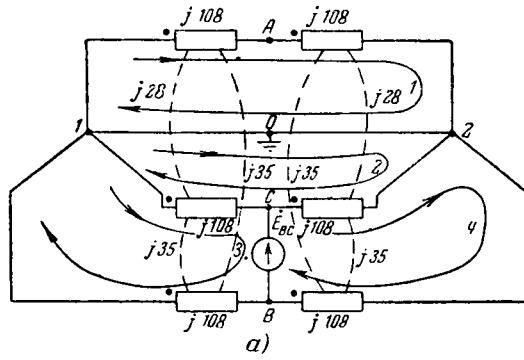


Рис. 7.

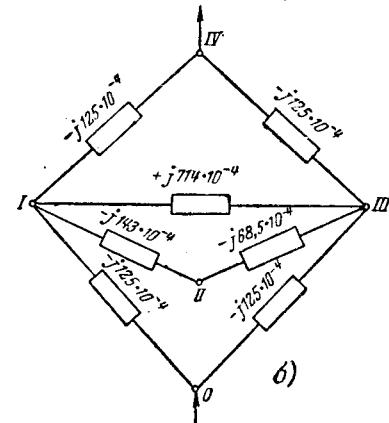
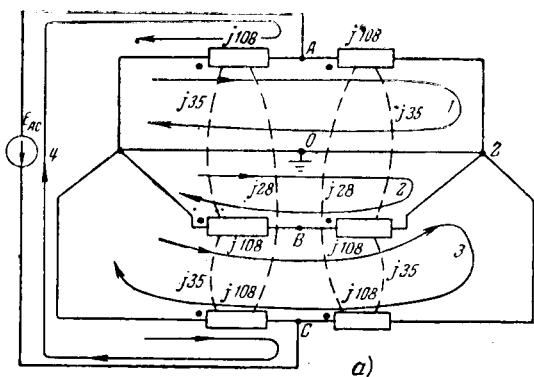
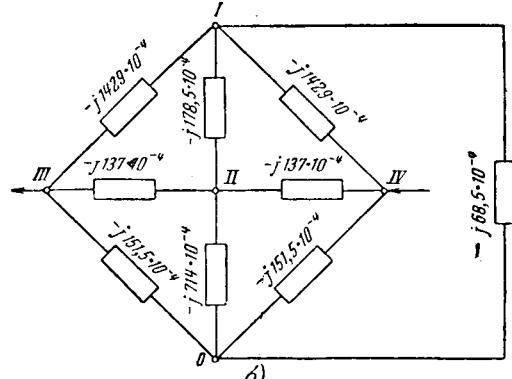


Рис. 8.

Схему рис. 8,б набрать на модели постоянного тока нельзя из-за наличия сопротивления со знаком, отличным от знака всех остальных сопротивлений схемы (между точками I и III).

Поэтому сначала набираем на модели схему без этого сопротивления и замеряем все входные сопротивления (табл. 7).

Таблица 7

	0	I	II	III	IV
0	0	$-j 82,6 \cdot 10^{-4}$	$-j 111,9 \cdot 10^{-4}$	$-j 82,8 \cdot 10^{-4}$	$-j 125,5 \cdot 10^{-4}$
I	$-j 82,6 \cdot 10^{-4}$	0	$-j 82,7 \cdot 10^{-4}$	$-j 79,3 \cdot 10^{-4}$	$-j 82,7 \cdot 10^{-4}$
II	$-j 111,9 \cdot 10^{-4}$	$-j 82,7 \cdot 10^{-4}$	0	$-j 55,0 \cdot 10^{-4}$	$-j 112,0 \cdot 10^{-4}$
III	$-j 82,8 \cdot 10^{-4}$	$-j 79,3 \cdot 10^{-4}$	$-j 55,0 \cdot 10^{-4}$	0	$-j 82,7 \cdot 10^{-4}$
IV	$-j 125,5 \cdot 10^{-4}$	$-j 82,7 \cdot 10^{-4}$	$-j 112,0 \cdot 10^{-4}$	$-j 82,7 \cdot 10^{-4}$	0

Пользуясь формулой (3), подсчитываем  $z'_{0-IV}$ . Оно оказывается равным  $-j125,5 \cdot 10^{-4}$ . Тогда искомое входное сопротивление будет:

$$z_{CA} = \frac{1}{-j125,5 \cdot 10^{-4}} = j79,7 \text{ ом}.$$

В схеме рис. 9,б также имеется сопротивление (между точками I и II) со знаком, отличным от знака всех остальных сопротивлений схемы.

Поступаем аналогично предыдущему. Входные сопротивления для схемы без этого сопротивления, замеренные на модели постоянного тока, даны в табл. 8.

По формуле (3) подсчитываем  $z'_{III-IV}$ . Оно равно  $-j186,6 \cdot 10^{-4}$ . Входное сопротивление составляет:

$$z_{B0} = \frac{1}{-j186,6 \cdot 10^{-4}} = j53,6 \text{ ом}.$$

Таблица 8

	0	I	II	III	IV
0	0	$-j 51,3 \cdot 10^{-4}$	$-j 51,3 \cdot 10^{-4}$	$-j 127,1 \cdot 10^{-4}$	$-j 127,1 \cdot 10^{-4}$
I	$-j 51,3 \cdot 10^{-4}$	0	$-j 79,1 \cdot 10^{-4}$	$-j 129,6 \cdot 10^{-4}$	$-j 129,7 \cdot 10^{-4}$
II	$-j 51,3 \cdot 10^{-4}$	$-j 79,1 \cdot 10^{-4}$	0	$-j 101,4 \cdot 10^{-4}$	$-j 101,4 \cdot 10^{-4}$
III	$-j 127,1 \cdot 10^{-4}$	$-j 129,6 \cdot 10^{-4}$	$-j 101,4 \cdot 10^{-4}$	0	$-j 186,6 \cdot 10^{-4}$
IV	$-j 127,1 \cdot 10^{-4}$	$-j 129,7 \cdot 10^{-4}$	$-j 101,4 \cdot 10^{-4}$	$-j 186,6 \cdot 10^{-4}$	0

Для определения распределения напряжений предварительно по формулам (1), (2) и (3) подсчитываем соответствующие входные сопротивления схемы рис. 7,б (табл. 9).

### Таблица 9

	0	I	II	III
III	$-j 128,4 \cdot 10^{-4}$	$-j 134,2 \cdot 10^{-4}$	$-j 102,4 \cdot 10^{-4}$	0
IV	$-j 128,4 \cdot 10^{-4}$	$-j 134,2 \cdot 10^{-4}$	$-j 102,4 \cdot 10^{-4}$	$-j 252,5 \cdot 10^{-4}$

По формуле (4), полагая  $U_{IV}=1$  и  $U_{III}=0$ , найдем напряжение остальных узловых точек:

$$U_0 = 0,5; \quad U_I = 0,5; \quad U_{II} = 0,5.$$

Далее подсчитываем значения напряжений узловых точек относительно „нуля“ дуальной схемы, равные коэффициентам распределения тока  $I_{BZ}$ :

$$U_{I=0} = 0; \quad U_{II=0} = 0; \quad U_{III=0} = -0,5; \quad U_{IV=0} = +0,5.$$

Рассматриваемый пример имеет лишь иллюстративный характер. Дуалные схемы, изображенные на рис. 6, б, 7, б,

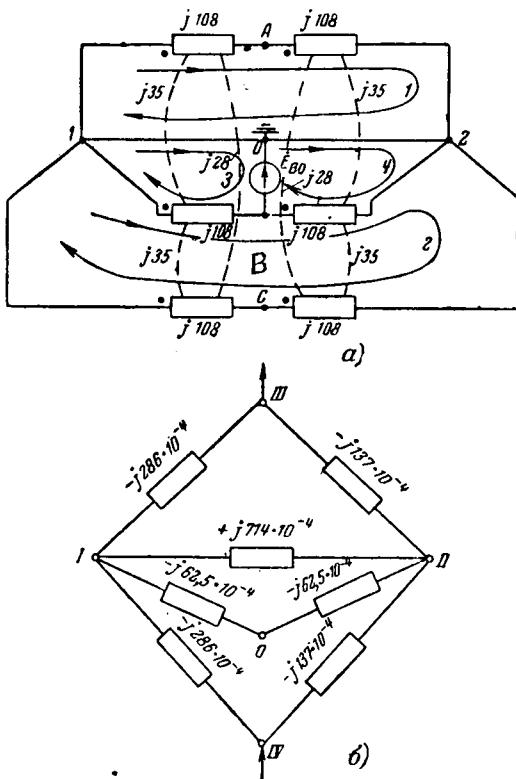


Рис. 9

8, б, 9, б, обладают известной симметрией. В них имеются попарно равные сопротивления и вследствие этого точки равного потенциала. Это дает возможность в данном частном случае очень просто аналитически проверить точность определения всех обобщенных параметров на модели постоянного тока, а заодно и выяснить влияние поправки на их значениях на конечный результат расчета режима.

В табл. 10 приведены значения входных и общих сопротивлений: в числителе по результатам аналитического расчета, в знаменателе — из расчета на модели постоянного тока.

Таблица 10

	Входные сопротивления, ом			Эквивалентные сопротивления, ом		
	A	B	C	AB	BC	CA
0	$j \frac{54,0}{53,6}$	$j \frac{54,0}{53,6}$	$j \frac{54,0}{53,6}$	$j \frac{17,5}{17,4}$	$j \frac{17,5}{17,4}$	$j \frac{14,0}{13,8}$

Значения коэффициентов распределения задающих токов приведены в табл. 11. За положительное направление здесь условно принято направление от точки, соответствующей первому индексу в обозначении ветви схемы, к точке, соответствующей второму индексу.

Таблица 11

	1 - A	2 - A	1 - B	2 - B	1 - C	2 - C
$I_{A\Sigma}$	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
$I_{B\Sigma}$	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0
$I_{C\Sigma}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5

Последовательность итерационного процесса расчета принятая следующая.

Напряжение в середине какой-либо фазы  $i$  в  $n$ -м приближении подсчитывается по формуле:

$$\dot{U}_i^{(n)} = \dot{U}_i^{(0)} - \Delta \dot{U}_i^{(n)},$$

где  $\dot{U}_i^{(n)}$  — напряжение в середине фазы  $i$  в  $n$ -м приближении;

$\dot{U}_i^{(0)}$  — напряжение в середине фазы  $i$  в нулевом приближении;

$\Delta U_i^{(n)}$  — падение напряжения, вызванное задающими токами, от точки баланса 0 до середины фазы  $i$ .

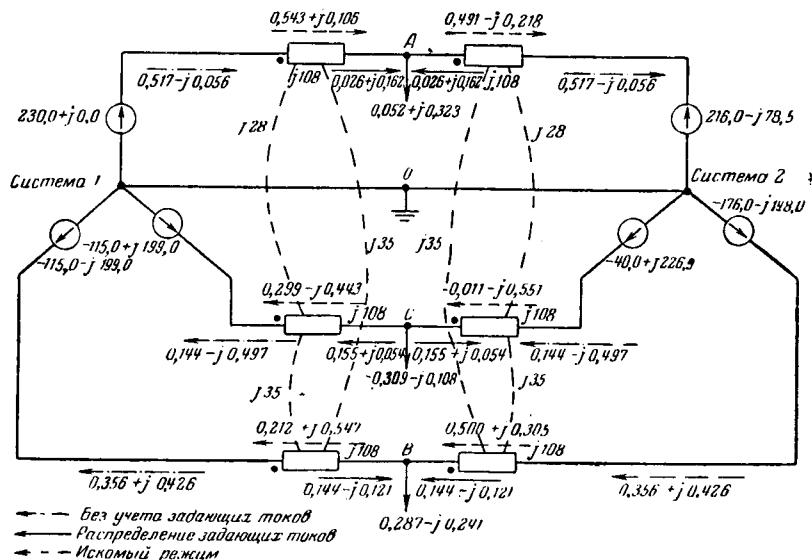


Рис. 10.

В свою очередь:

$$\Delta \dot{U}_i^{(n)} = I_i^{(n)} \cdot z_{0i} + \sum_{j \neq i} I_j^{(n)} \cdot z_{ij(0)},$$

где  $I_i^{(n)}$ ,  $I_j^{(n)}$  — задающий ток в  $n$ -м приближении соответственно фазам  $i$  и  $j$ ;

$z_{0i}$  — входное сопротивление фазы  $i$ ;

$z_{ij(0)}$  — эквивалентное сопротивление фаз  $i$  и  $j$  относительно точки 0.

Задающие токи в  $n$ -м приближении определяются по известным напряжениям в середине фазы в  $(n-1)$  приближении по следующим формулам:

$$\begin{aligned} I_{A\Sigma}^{(n)} &= I_A^{(n)} + I_{AB}^{(n)} - I_{CA}^{(n)}; \quad I_{B\Sigma}^{(n)} = I_B^{(n)} + I_{BC}^{(n)} - I_{AB}^{(n)}; \\ I_{C\Sigma}^{(n)} &= I_C^{(n)} + I_{CA}^{(n)} - I_{BC}^{(n)}; \quad I_A^{(n)} = \dot{y}_A \cdot \dot{U}_A^{(n-1)}; \\ I_B^{(n)} &= \dot{y}_B \cdot \dot{U}_B^{(n-1)}; \quad I_C^{(n)} = \dot{y}_C \cdot \dot{U}_C^{(n-1)}; \quad I_{AB}^{(n)} = \dot{y}_{AB} \cdot \dot{U}_{AB}^{(n-1)}; \\ I_{BC}^{(n)} &= \dot{y}_{BC} \cdot \dot{U}_{BC}^{(n-1)}; \quad I_{CA}^{(n)} = \dot{y}_{CA} \cdot \dot{U}_{CA}^{(n-1)}; \\ \dot{U}_{AB}^{(n-1)} &= \dot{U}_A^{(n-1)} - \dot{U}_B^{(n-1)}; \quad \dot{U}_{BC}^{(n-1)} = \dot{U}_B^{(n-1)} - \dot{U}_C^{(n-1)}; \\ \dot{U}_{CA}^{(n-1)} &= \dot{U}_C^{(n-1)} - \dot{U}_A^{(n-1)}. \end{aligned}$$

В нулевом приближении напряжения в середине фаз линий принимаются равными значениям, подсчитанным в предположении равенства между всеми задающими токами, в соответствии со схемой рис. 5 (кв):

$$\begin{aligned} \dot{U}_A^{(0)} &= 223,0 - j39,2 = 226 \angle -10,0^\circ; \\ \dot{U}_{AB}^{(0)} &= 368,5 + j134,3 = 392 \angle 20,0^\circ; \\ \dot{U}_B^{(0)} &= -145,5 - j173,2 = 226 \angle 230,0^\circ; \\ \dot{U}_{BC}^{(0)} &= -68,0 - j386,2 = 392 \angle 260,0^\circ; \\ \dot{U}_C^{(0)} &= -77,5 + j212,7 = 226 \angle 110,0^\circ; \\ \dot{U}_{CA}^{(0)} &= -300,5 + j251,9 = 392 \angle 140,0^\circ. \end{aligned}$$

Токи в первом приближении (кв):

$$\begin{aligned} I_A^{(1)} &= 0,040 + j0,224; \quad I_{AB}^{(1)} = -0,020 + j0,055; \\ I_B^{(1)} &= 0,194 - j0,163; \quad I_{BC}^{(1)} = 0,057 - j0,010; \\ I_C^{(1)} &= -0,214 - j0,077; \quad I_{CA}^{(1)} = -0,030 - j0,036; \\ I_{A\Sigma}^{(1)} &= 0,050 + j0,315; \quad I_{B\Sigma}^{(1)} = 0,271 - j0,228; \\ I_{C\Sigma}^{(1)} &= -0,301 - j0,103. \end{aligned}$$

Для сравнения дальнейший расчет выполняется по параметрам, подсчитанным аналитически (числитель), и по параметрам, подсчитанным на модели (знаменатель).

Падения напряжения в первом приближении (кв):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_A^{(1)} &= \frac{-11,6 + j3,2}{-11,5 + j3,2}; \quad \Delta \dot{U}_B^{(1)} = \frac{8,6 + j10,2}{8,5 + j10,2}; \\ \Delta \dot{U}_C^{(1)} &= \frac{5,2 - j10,8}{5,2 - j10,7}. \end{aligned}$$

Напряжения по середине фаз в первом приближении (кв):

$$\begin{aligned} \dot{U}_A^{(1)} &= \frac{234,6 - j42,4}{234,5 - j42,4} = 238 \angle -10,2^\circ; \\ \dot{U}_{AB}^{(1)} &= \frac{388,7 + j141,3}{388,5 + j141,3} = 414 \angle 20,0^\circ; \\ \dot{U}_B^{(1)} &= \frac{-154,1 - j183,7}{-154,0 - j183,7} = 240 \angle 230,0^\circ; \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{BC}^{(1)} = \frac{-71,4 - j407,2}{-71,3 - 407,1} = 414 \angle 260,1^\circ;$$

$$\dot{U}_C^{(1)} = \frac{-82,7 + j223,5}{-82,7 + j223,4} = 238 \angle 110,3^\circ;$$

$$\dot{U}_{CA}^{(1)} = \frac{-317,3 + j265,9}{-317,2 + j265,9} = 414 \angle 140,0^\circ.$$

По этим значениям напряжений подсчитываем токи во втором приближении. Они равны (кв):

$$I_A^{(2)} = \frac{0,041 + j0,227}{0,041 + j0,227}; \quad I_B^{(2)} = \frac{0,205 - j0,172}{0,205 - j0,172},$$

$$I_C^{(2)} = \frac{-0,216 - j0,081}{-0,216 - j0,081}; \quad I_{AB}^{(2)} = \frac{-0,021 + j0,058}{-0,021 + j0,058},$$

$$I_{BC}^{(2)} = \frac{0,061 - j0,011}{0,061 - j0,011}; \quad I_{CA}^{(2)} = \frac{-0,032 - j0,038}{-0,032 - j0,038},$$

$$I_{A\Sigma}^{(2)} = \frac{0,052 + j0,323}{0,052 + j0,323}; \quad I_{B\Sigma}^{(2)} = \frac{0,287 - j0,241}{0,287 - j0,241},$$

$$I_{C\Sigma}^{(2)} = \frac{-0,309 - j0,108}{-0,309 - j0,108}.$$

Зная токи во втором приближении, находим напряжения по середине фаз линий во втором приближении (кв):

$$\Delta \dot{U}_A^{(2)} = \frac{-11,7 + j3,5}{-11,6 + j3,5}; \quad \Delta \dot{U}_B^{(2)} = \frac{9,2 + j11,0}{9,2 + j10,9},$$

$$\Delta \dot{U}_C^{(2)} = \frac{5,6 - j11,0}{5,6 - j11,0},$$

$$\dot{U}_A^{(2)} = \frac{234,7 - j42,7}{234,6 - j42,7} = 238 \angle -10,2^\circ;$$

$$\dot{U}_B^{(2)} = \frac{-154,7 - j184,5}{-154,7 - j184,4} = 241 \angle 230,0^\circ;$$

$$\dot{U}_C^{(2)} = \frac{-83,0 + j223,7}{-83,1 + j223,7} = 238 \angle 110,4^\circ.$$

Напряжения по величине и фазе во втором и в первом приближениях практически совпадают. Поэтому на этом итерационный процесс можно закончить и принять значения задающих токов, подсчитанные во втором приближении. Нетрудно заметить, что в данном расчете неточность в определении обобщенных параметров практически не сказалась на точности расчета режима.

На токораспределение, найденное без учета задающих токов, накладывается распределение задающих токов и результаты находим на схему рис. 10.

Полученное токораспределение и является искомым.

В целях проверки правильности результатов расчетов режима подсчитаем дважды напряжение по середине каждой фазы линии (кв), идя от левой и от правой нейтралей схемы независимо:

$$\Delta \dot{U}_{1-A} = 234,6 - j42,8 = 238 \angle -10,3^\circ;$$

$$\Delta \dot{U}_{2-A} = 234,8 - j42,7 = 238 \angle -10,2^\circ;$$

$$\Delta \dot{U}_{1-B} = -154,9 - j184,4 = 241 \angle 230,0^\circ;$$

$$\Delta \dot{U}_{2-B} = -154,8 - j184,4 = 241 \angle 230,0^\circ;$$

$$\Delta \dot{U}_{1-C} = -83,3 + j223,6 = 238 \angle 110,5^\circ;$$

$$\Delta \dot{U}_{2-C} = -82,9 - j223,9 = 238 \angle 110,3^\circ.$$

Анализируя полученные результаты, можно прийти к выводу, что расчет выполнен правильно и что точность его вполне достаточная для практических целей.



# Ресинхронизация гидрогенератора электрическим торможением

Кандидат техн. наук, доц. Д. Е. ТРОФИМЕНКО

Уральский политехнический институт им. Кирова

Синхронизм генераторов при нарушениях устойчивости или при несинхронных автоматических повторных включениях, как правило, восстанавливается, и довольно быстро. Однако при слабых связях, когда передача мощности осуществляется при больших углах и асинхронный ход сопровождается большим скольжением, синхронный режим часто не восстанавливается.

В системах с гидрогенераторами [Л. 1] асинхронная работа продолжается более длительно, а при нарушениях статической устойчивости восстановление синхронизма без специальных мероприятий часто невозможно.

Уменьшения колебания и сокращения длительности асинхронного хода можно добиться такими, например, мероприятиями, как снятие возбуждения и разгрузка первичных двигателей ускоряющихся генераторов. Однако осуществление их вручную, особенно при большом количестве машин, затруднительно [Л. 2], и они в этом случае не всегда дают положительный результат. Поэтому иногда бывает целесообразно применять автоматическое устранение асинхронного хода и ускорение процесса затухания колебаний [Л. 3], например, путем электрического торможения, результаты аналитического исследования которого и приводятся в настоящей статье.

В задачу исследования входило нахождение такого способа управления торможением, который обеспечил бы устранение различных асинхронных режимов, установление необходимых параметров чагрузочного (тормозного) сопротивления и выяснение влияния запаздывания регулятора скорости турбины.

Все эти вопросы решались для расчетной схемы электропередачи (рис. 1) с такими параметрами, при которых втягивание в синхронизм исследуемого гидрогенератора без специальных мер невозможно. Столь тяжелые условия ресинхронизации обусловлены отсутствием успокоительных обмоток у гидрогенератора и слабой связью последнего с системой бесконечно большой мощности. В установленном режиме работы угол при передаче номинальной мощности составляет 50—53°.

Подключение и отключение нагрузочного сопротивления к зажимам генератора рассматривалось устройством, имеющим запаздывание во времени действия не более чем на 0,03—0,05 сек. При таком запаздывании, которого можно добиться надлежащей настройкой схемы управления устройством, автоматическая ресинхронизация и повышение динамической устойчивости могут быть осуществлены [Л. 4] одним и тем же устройством.

Найденный для этих условий способ управления нагрузочным сопротивлением и параметры последнего проверялись расчетным путем для гидрогенератора с успокоительными обмотками и автоматическим регулированием возбуждения в виде устройства компаундирования и форсирования возбуждения.

Все расчеты проводились методом последовательных интервалов с учетом переходных процессов в роторе. Принимался интервал времени 0,025—0,05 сек. Изменение температуры нагружочного (чугунного) сопротивления учитывалось по способу, который был применен в исследованиях динамической устойчивости при электрическом торможении [Л. 4]. Для определения изменения момента турбины, вызванного действием регулятора скорости, использовалось приближенное уравнение

$$\Delta M_t = \frac{s}{\sigma(1+pT_c)},$$

которое решалось при постоянстве скольжения в каждом интервале времени [Л. 5]. В уравнении приняты следующие обозначения:  $\sigma$  — коэффициент неравномерности регулятора скорости,  $T_c$  — постоянная времени сервомотора,  $s$  — скольжение (при скорости вращения выше синхронной отрицательно). Момент сопротивления турбины во всех случаях принимался постоянным, равным 6% номинального.

Для решения поставленной задачи исследовалась переходные процессы при торможении во время асинхронного хода, возникшего по любой причине. Даже в том случае, когда асинхронному режиму предшествовала раздельная работа генератора, торможение целесообразно начинать после несинхронного повторного включения. Объясняется это тем, что быстро снизить скорость вращения раздельно работающего генератора при небольшом сопротивлении можно только во время асинхронного режима путем включения и отключения сопротивления в соответствующие моменты времени. Своевременное периодическое торможение в процессе асинхронного хода позволяет компенсировать действие ускоряющего момента и одновременно использовать положительную роль тормозного момента в каждом цикле качаний.

Для определения оптимального способа управления торможением проводились расчеты ресинхронизации: 1) при асинхронных режимах, характеризующихся в момент первого подключения нагрузочного сопротивления скольжением  $s_0 = -(12-3)\%$ , и моментом турбины  $M_{t0} = 0-0,6$  номинального; 2) при первом торможении в разные моменты времени, отвечающие значениям угла  $\delta$ , равным 0; 90 и 270°; 3) при последующих включе-

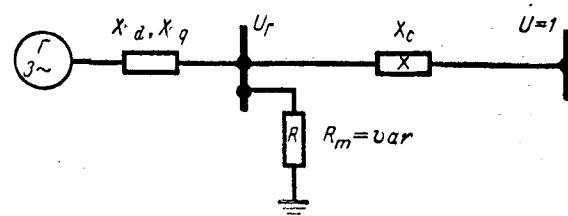


Рис. 1. Расчетная схема.

$x_d = 0,72$ ;  $x_q = 0,44$ ;  $x'_d = 0,18$ ;  $x_c = 0,47$  (при  $S_{баз} = P_{ном,г}$  и  $U_{баз} = U_{ном,г}$ );  $T_{d0} = 7,5$  сек;  $T_I = 6$  сек.

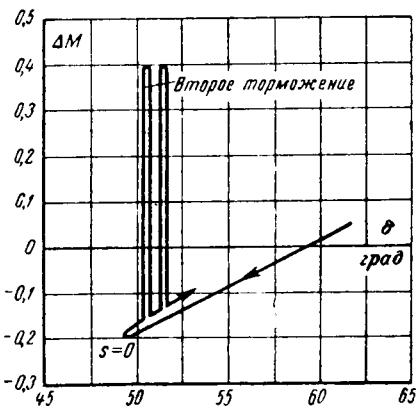


Рис. 2. Процесс электрического торможения при повышении динамической устойчивости.

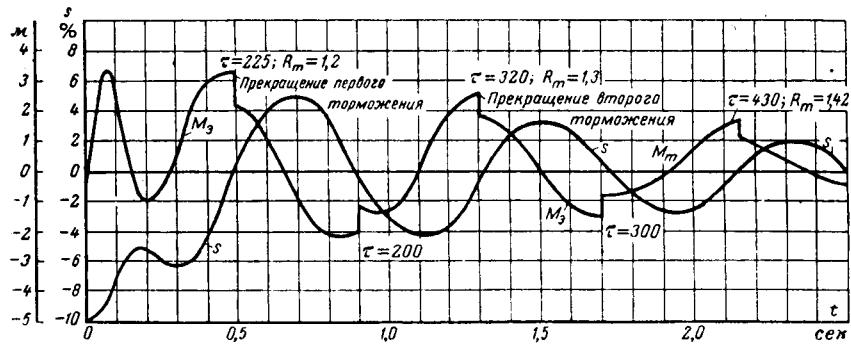


Рис. 4. Процесс ресинхронизации при электрическом торможении ( $\sigma = 0,05$ ;  $T_c = 5$  сек;  $G = 4,3$  кг/Мвт;  $s_0 = 10^\circ$ ;  $M_{to} = 0$ ).

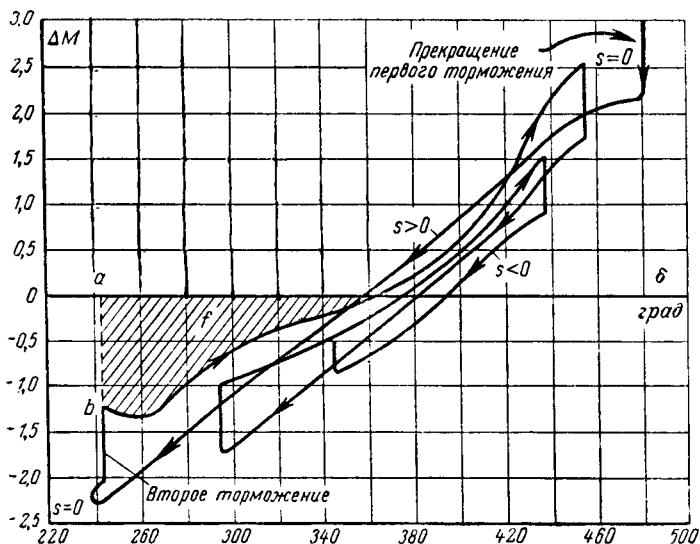


Рис. 3. Процесс электрического торможения при ресинхронизации.

ниях и отключениях нагрузочного сопротивления во время перехода скольжения через нуль или во время изменения знака избыточного момента ( $\Delta M = M_3 - M_t$ , где  $M_3$  — электромагнитный момент генератора,  $M_t$  — момент турбины в переходном режиме).

Расчеты<sup>1</sup> позволили определить следующий оптимальный способ управления торможением, обеспечивающий успешное втягивание в синхронизм во всех случаях: а) первое торможение производится в момент изменения знака избыточного момента с отрицательного на положительный (угол  $\delta = 0$ ); б) первое и последующие торможения прекращаются в моменты изменения знаков скольжения с отрицательных на положительные или раньше, если нагрузочное сопротивление нагрелося до предельной температуры (порядка  $500^\circ$ ); в) второе и последующие торможения производятся в момен-

ты изменения знаков скольжения с положительных на отрицательные.

Найденный способ отличается от оптимального способа повышения динамической устойчивости тем, что при последнем способе повторные торможения целесообразно вводить позднее, в момент изменения знака избыточного момента ( $\Delta M = M_3 - M_t$ ) с отрицательного на положительный [Л. 4], а не в момент перехода скольжения через нуль. Это различие связано с тем, что при ресинхронизации избыточные моменты при отключенном сопротивлении могут превышать двукратное значение номинального момента, а при качаниях, во время короткого замыкания и после его ликвидации, они не превышают 0,2—0,4.

Поэтому при нагрузочном сопротивлении  $R_{to} = 1$  (сопротивление, которое в холодном состоянии при номинальном напряжении поглощает номинальную мощность генератора) и качаниях с амплитудой  $\Delta M = (0,2—0,4) M_{th}$  введение торможения в момент прохождения скольжения через нуль приводит к значительному снижению ускоряющего момента даже с переменой знака, что требует очень быстро прекращения торможения (рис. 2). Но поскольку после такого прекращения торможения избыточный момент остается ускоряющим, необходимо вводить торможение вновь. Этого не требуется при торможении во время ресинхронизации, так как введение, например, второго торможения при  $s = 0$  снижает избыточный момент (рис. 3) только частично. Осуществлять торможение сопротивлением  $R_{to} > 1$  при нарушениях динамической устойчивости и сопротивлением  $R_{to} < 1$  при ресинхронизации нежелательно из-за малого повышения динамической устойчивости в первом цикле качаний в первом случае и больших набросов мощности на генератор во время первого торможения во втором случае.

Как видно из рис. 3 (площадь  $f$ , пропорциональная энергии ускорения, уменьшена за счет торможения нагрузочным сопротивлением), найденный способ управления торможением не противоречит физике явлений.

В результате указанных выше расчетов также найден был необходимый вес одного и двух нагрузочных сопротивлений. При одном сопротивлении  $R_{to} = 1$  его вес должен быть равен 4,0—4,5 кг на каждый мегаватт номинальной мощности гене-

<sup>1</sup> Расчеты выполнялись при участии Г. В. Власова, Ю. Г. Вовкотруба, А. С. Гусева, В. А. Шестакова, С. Г. Шемякина и В. П. Щеглова.

ратора, а при двух сопротивлениях  $R_{\text{то}}=1$  вес каждого из них должен равняться примерно  $2,0-2,2 \text{ кг}/\text{Мвт}$ . Процесс ресинхронизации при помощи сопротивления весом  $4,3 \text{ кг}/\text{Мвт}$ , управляемого указанным выше способом, приведен на рис. 4.

Найденный способ управления торможением рассматривался также применительно к асинхронным режимам со скольжениями  $s_0=3$  и  $5\%$  при моментах турбины во время введения первого торможения  $M_{\text{то}}=0,2$  и  $0,4$ . Как и следовало ожидать, втягивание в синхронизм в этом случае происходит быстрее. Например, при скольжении  $s_0=5\%$  первое торможение позволяет устранить асинхронный режим (рис. 5) и снизить скольжение до нуля за  $0,2$  сек. С достаточной точностью вес нагрузочного сопротивления ( $R_{\text{то}}=1$ ) из условий нагрева его за время первого торможения до  $220-230^\circ$  и снижения за это время скольжения до нуля может приниматься равным  $0,4$ .  $s_0 = \text{кг}/\text{Мвт}$ , где  $s_0$  — скольжение при наиболее тяжелом из возможных асинхронном режиме.

Расчеты, выполненные при разных постоянных времени сервомотора, показали положительное влияние инерционности сервомотора на ресинхронизацию, что совпадает с результатами исследований, проведенными без электрического торможения [Л. 6 и 7]. Об этом свидетельствуют данные, приведенные в таблице.

**Максимальные значения скольжения при качаниях после прекращения первого торможения**  
(За 100% приняты скольжения, равные  $5\%$  при  $s_0=-10\%$  и  $2\%$  при  $s_0=-3\%$ )

$M_{\text{то}}=0, s_0=-10\%$		$M_{\text{то}}=0,2, s_0=-3\%$		
$T_c=3 \text{ сек}$	$T_c=5 \text{ сек}$	$T_c=3 \text{ сек}$	$T_c=5 \text{ сек}$	$T_c=\infty$
100	100	100	100	100
-86	-84	-75	-63	-50
72	69	41	34	22
-62	-59	-23	-20	-13
50	40	17		

Расчеты ресинхронизации гидрогенератора при тех же условиях, но с успокоительными обмотками на роторе, подтвердили положительную роль последних в гашении качаний. Влияние на процесс ресинхронизации продольной обмотки оказалось небольшим, а поперечной — значительным (рис. 5). Максимальное отклонение скольжения при наличии поперечной обмотки снижается до  $1,3\%$  после второго торможения, а при отсутствии — до  $2\%$  только после третьего торможения. В связи с этим для ресинхронизации машины с успокоительными обмотками достаточно нагрузочного сопротивления весом примерно  $0,3s_0$  вместо  $0,4 s_0 \text{ кг}/\text{Мвт}$  при отсутствии успокоительных обмоток.

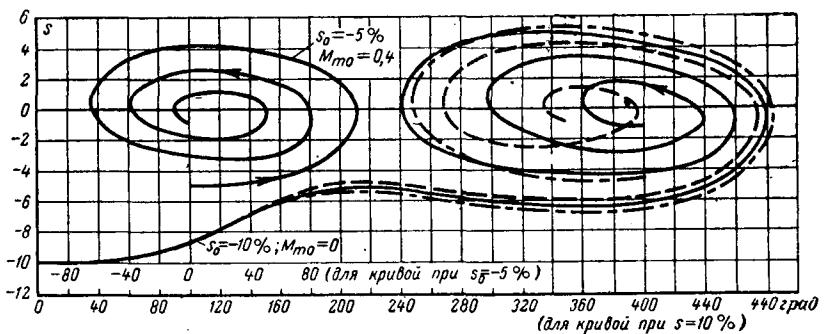


Рис. 5. Изменение скольжения при торможении ( $\sigma = 0,05; T = 5 \text{ сек}; G = 4,3 \text{ кг}/\text{Мвт}$ ).

— без успокоительных обмоток и автоматического регулирования возбуждения; — — — с успокоительными обмотками, но без автоматического регулирования возбуждения; - · - · - без успокоительных обмоток, но с автоматическим регулированием возбуждения.

Форсирование, а также автоматическое регулирование возбуждения в виде компаундирования оказывает небольшое влияние на процесс ресинхронизации, увеличивая электромагнитную мощность генератора и колебания скольжения.

Таким образом, проведенное исследование, позволившее установить оптимальный способ управления торможением и параметры нагрузочного сопротивления, а также исследование динамической устойчивости при электрическом торможении [Л. 4], показали, что одно и то же устройство торможения может быть использовано как для ресинхронизации, так и для повышения устойчивости. При таком совмещении нагрузочное устройство должно состоять как бы из двух устройств, одно из которых — для повышения динамической устойчивости, а оба вместе — для ресинхронизации. Для повышения устойчивости второе и последующие торможения желательно вводить в момент изменения знака избыточного момента, а для ресинхронизации — в моменты прохождения скольжения через нуль.

#### Литература

1. Сыромятников И. А., Об устойчивости энергетических систем, «Электричество», 1957, № 1.
2. Мамиконянц Л. Г., Соловьев С. А. и Хачагуров А. А., Асинхронные режимы, несинхронные включения и ресинхронизация генераторов Куйбышевской ГЭС, «Электричество», 1957, № 11.
3. Сыромятников И. А., Электроавтоматика как средство повышения надежности работы энергосистем, «Электричество», 1961, № 7.
4. Трофименко Д. Е., Устойчивость гидрогенератора при электрическом торможении, «Электричество», 1962, № 2.
5. Веников В. А., Электромеханические переходные процессы в электрических системах, Госэнергоиздат, 1958.
6. Маркович И. М. и Соловьев С. А., Экспериментальное исследование ресинхронизации генераторов, «Электричество», 1955, № 4.
7. Чеснов М. П., Влияние параметров регуляторов скорости турбины на ресинхронизацию генератора, «Электричество», 1961, № 2.

(8.10.1963)



# Работа электрических систем с АРВ сильного действия вблизи границы области устойчивости

Кандидат техн. наук И. В. ЛИТКЕНС и инж. В. П. ВАСИН  
Московский энергетический институт

**Введение.** При выборе настройки АРВ синхронных машин, обеспечивающей статическую устойчивость во всех режимах работы электрической системы (меняющихся с изменением нагрузки, схемы и параметров элементов), система может иногда оказаться вблизи границы области статической устойчивости.

При этом на характер поведения системы в переходных процессах начинают оказывать существенное влияние ее нелинейности.

В [Л. 1] показано, что поведение нелинейной системы вблизи границы устойчивости, определяемой по уравнениям первого приближения, может быть двух существенно различных видов в зависимости от того устойчива ли система на самой границе.

В соответствии с этим границы устойчивости разделяются на опасные и безопасные. Безопасные — это такие границы, при нарушении которых возникают лишь незначительные отклонения от состояния равновесия (в случае колебательной границы устойчивости в системе возникают автоколебания, соответствующие устойчивому предельному циклу). Отклонения от состояния равновесия (амплитуда автоколебания) при этом могут быть сделаны сколь угодно малыми выбором достаточно малого нарушения границы.

Опасные — это такие границы, малейшее нарушение которых приводит к нарастанию отклонения системы от состояния равновесия (к непрерывному нарастанию амплитуды колебаний). Вблизи опасной границы (внутри области устойчивости) система, устойчивая при малых отклонениях, оказывается неустойчивой при некоторых конечных возмущениях, величина которых тем меньше, чем ближе система к опасной границе.

В [Л. 2 и 3] показано, что для автоматически регулируемой электрической системы области устойчивости могут иметь место как опасные, так и безопасные границы. Поэтому важно разработать достаточно простые методы разделения границ устойчивости на опасные и безопасные и на основе этого разделения дать рекомендации для выбора настройки регуляторов, обеспечивающей большую надежность работы системы.

В настоящей работе поведение автоматически регулируемой электрической системы вблизи границы области устойчивости изучается экспериментально на физической модели энергосистемы и аналитически с помощью приближенных методов исследования нелинейных дифференциальных уравнений.

Для разделения границы области устойчивости, построенной в координатах коэффициентов регулирования по производным АРВ сильного действия, на опасные и безопасные разработан способ, основанный на методе гармонической линеаризации. Этот способ дает более простое решение по сравнению с вычислением ляпуновских величин,

при помощи которых производится разделение границ в [Л. 1].

Как показано в приложении, разделение границ устойчивости на опасные и безопасные с помощью предлагаемого в настоящей работе метода совпадает с результатами, полученными путем вычисления ляпуновской величины.

**Экспериментальные исследования** поведения автоматически регулируемой электрической системы вблизи границы устойчивости проводились на динамической модели МЭИ.

В электрической системе, принципиальная схема которой приведена на рис. 1, в различных режимах снимались границы области статической устойчивости (рис. 2 и 3). Изучался визуально с помощью осциллографа характер поведения системы при некоторых постоянных настройках регулятора и их переключении. Осциллографировались основные параметры режима: напряжение  $U_r$  шин генератора, ток  $I_r$  статора генератора, ток  $I_p$  ротора генератора, угол  $\delta$  между э. д. с. генератора и напряжением системы, напряжение  $U_b$  возбудителя, на обмотку возбуждения которого подается выход АРВ.

Из анализа осциллограмм (рис. 4, 5) видно, что при нарушении границ происходит раскачивание системы с определенной частотой, которая зависит от места нарушения границы устойчивости. По мере возрастания амплитуды колебаний частота колебаний уменьшается вследствие влияния нелинейностей.

В отдельных случаях раскачивание продолжается вплоть до выпадения системы из синхронизма (рис. 5, осц. 8 и 9).

В других случаях нарастание колебаний прекращается: в системе устанавливаются автоколебания (рис. 4, осц. 1—6; рис. 5, осц. 7).

На осциллограмме 10 (рис. 5) представлена работа системы внутри области устойчивости.

Из рассмотрения режима работы электрической системы можно заметить, что небольшое наруше-

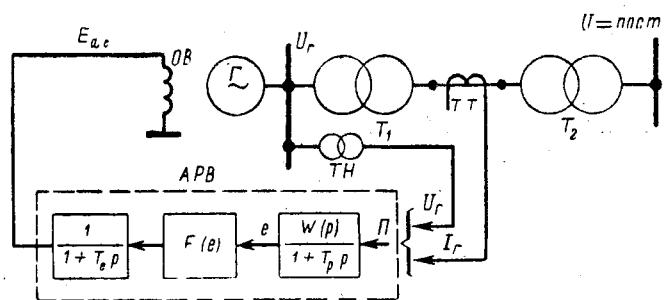


Рис. 1. Схема исследуемой системы.

$\Pi$  — параметр регулирования.

$W(p) = k_{0\Pi} + k_{1\Pi} p + k_{2\Pi} p^2$  — передаточная функция регулятора;  $T_e$ ,  $T_p$  — постоянные времени возбудителя и измерительного элемента регулятора;  $F(e)$  — передаточная функция силового блока регулятора возбуждения.

ние некоторых участков границы области устойчивости не вызывает ухудшения качества работы системы (рис. 4, осц. 5): появляются автоколебания напряжения возбудителя с относительно высокой частотой; напряжение, ток генератора, угол  $\delta$  при этом не изменяются. Поэтому представляется возможной в случае необходимости (в каких-либо аварийных режимах) работа генератора при таких настройках АРВ. При больших нарушениях границы устойчивости в том же направлении (рис. 4, осц. 6) амплитуда колебаний напряжения  $U_v$  увеличивается. При этом появляются заметные колебания угла и других параметров системы.

Вместе с тем существуют участки границы области устойчивости, где даже при незначительном их нарушении система, не раскачиваясь до выпадения из синхронизма, имеет автоколебания с такими амплитудами, которые могут оказаться недопустимыми (рис. 4, осц. 1, 2). Поэтому изучение границ устойчивости ведется в дальнейшем с точки зрения практической допустимости их нарушения.

Будем считать границу устойчивости практически безопасной, если при ее нарушении возникают устойчивые колебания (автоколебания) режимных параметров безопасной для работы электрической системы амплитуды.

Если же при нарушении границы колебания возрастают до недопустимой амплитуды (в частном случае вплоть до выпадения из синхронизма), то такую границу будем считать практически опасной. На рис. 2, б и 3, а произведено согласно этому определению разделение границ на опасные (абв) и безопасные (вга).

**Теоретическое разделение границ** области устойчивости на опасные и безопасные производится на основе изучения поведения системы вблизи исследуемой границы. При этом отыскиваются периодические решения для настроек регулятора вблизи границы и исследуется их устойчивость. Вблизи безопасной границы должны существовать устойчивые периодические решения, вблизи опасной — неустойчивые.

При нарушении границы устойчивости в правую полуплоскость корней характеристического уравнения переходит одна пара корней, за исключением случая нарушения границы в одной точке, где ветви  $D$ -разбиения пересекаются (рис. 2, б). Остальные же корни имеют отрицательные действительные части. Составляющие переходного процесса, отвечающие корням с отрицательной действительной частью, затухнут, и процесс поэтому будет иметь явно выраженный одночастотный характер (рис. 4, 5). Исключая тот случай, когда нарушение границы происходит в указанной выше точке, для отыскания и исследования устойчивости периодических решений применим метод гармонической линеаризации.

Поскольку в электрической системе можно считать практически допустимыми колебания с малыми амплитудами угла и э. д. с.  $E_d$ , то при разделении границ на опасные и безопасные учитывается только нелинейность системы возбуждения  $F(e)$  (рис. 6), отражающая наличие потолочных ограничений в ее силовых элементах.

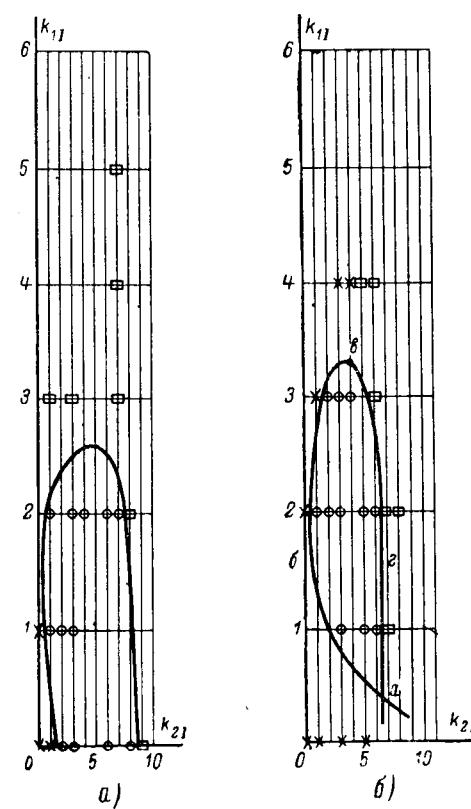


Рис. 2. Экспериментально снятые значения настроек регулятора вблизи границы области устойчивости.

#### Условные обозначения:

— устойчивая работа системы;  $\square$  — автоколебания;  $\times$  — раскачивание до выпадения из синхронизма.

Сетка нанесена в значениях коэффициентов регулирования, соответствующих положениям переключателя на шкале измерительного элемента АРВ.

Масштабы:  $k_{21}=1$  соответствует 0,12 единицы возбуждения/единица тока в секунду в квадрате;  $k_{11}=1$  соответствует 1,26 единицы возбуждения/единица тока в секунду в квадрате.

а — режим работы  $\delta=60^\circ$ ;  $k_{0v}=25$  единиц возбуждения/единица напряжения; б — режим работы  $\delta=80^\circ$ ;  $k_{0v}=25$  единиц возбуждения/единица напряжения.

Для упрощения анализа предполагается, что нелинейность  $F(e)$  симметрична относительно установленвшегося режима, т. е.

$$F(e_0 + \Delta e) - F(e_0) = F(e_0) - F(e_0 - \Delta e).$$

Запишем дифференциальные уравнения переходных процессов в электрической системе в виде системы уравнений (1), где в силу принятых предположений линеаризация всех нелинейностей, кроме  $F(e)$ , проведена по первому приближению

$$\left. \begin{aligned} (T_1 p^2 + P_d p + S) \Delta \delta + J \Delta E_d &= 0; \\ -NT' d p \Delta \delta + (1 + T' d p) \Delta E_d - \Delta E_{de} &= 0; \\ W(p) \frac{\partial \Pi}{\partial \delta} \Delta \delta + W_{II}(p) \frac{\partial \Pi}{\partial E_d} \Delta E_d - (1 + T_1 p) \Delta e &= 0; \\ (1 + T_e p) \Delta E_{de} - F(e_0 + \Delta e) + F(e_0) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $T_J$  — постоянная инерции станции;  
 $P_d$  — коэффициент демпфирования;

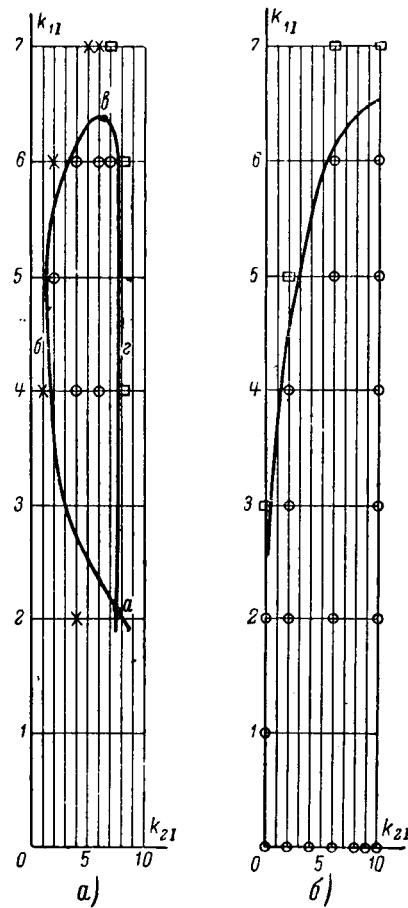


Рис. 3. Экспериментально снятые значения настроек регулятора вблизи границы области устойчивости.  
а — режим работы  $\delta=86^\circ$ ,  $k_{0v}=25$  единиц возбуждения/единица напряжения; б — режим работы  $\delta=60^\circ$ ,  $k_{0v}=0$ .

$N = \frac{U(x_d - x'_d)}{x_{d\Sigma}} \sin \delta_0$ ;

$$T'_d = \frac{x'_d \Sigma}{x_{d\Sigma}} T_{d0};$$

$$S = \frac{\partial P}{\partial \delta}; J = \frac{\partial P}{\partial E_d};$$

$\frac{\partial P}{\partial \delta}$ ,  $\frac{\partial P}{\partial E_d}$  — частные производные

от параметра регулирования по углу  $\delta$  и э. д. с.  $E_d$ ;

$W(p) = k_{0p} + k_{1p}p + k_{2p}p^2$  — передаточная функция регулятора возбуждения;

$T_p$ ,  $T_e$  — постоянные времена регулятора и возбудителя.

Периодические решения будем искать в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \delta &= a_1 \sin(\omega t + \varphi_1) = J_m [a_1 e^{j(\omega t + \varphi_1)}]; \\ \Delta E_d &= a_2 \sin(\omega t + \varphi_2) = J_m [a_2 e^{j(\omega t + \varphi_2)}]; \\ \Delta e &= a \sin \omega t = J_m a e^{j\omega t}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

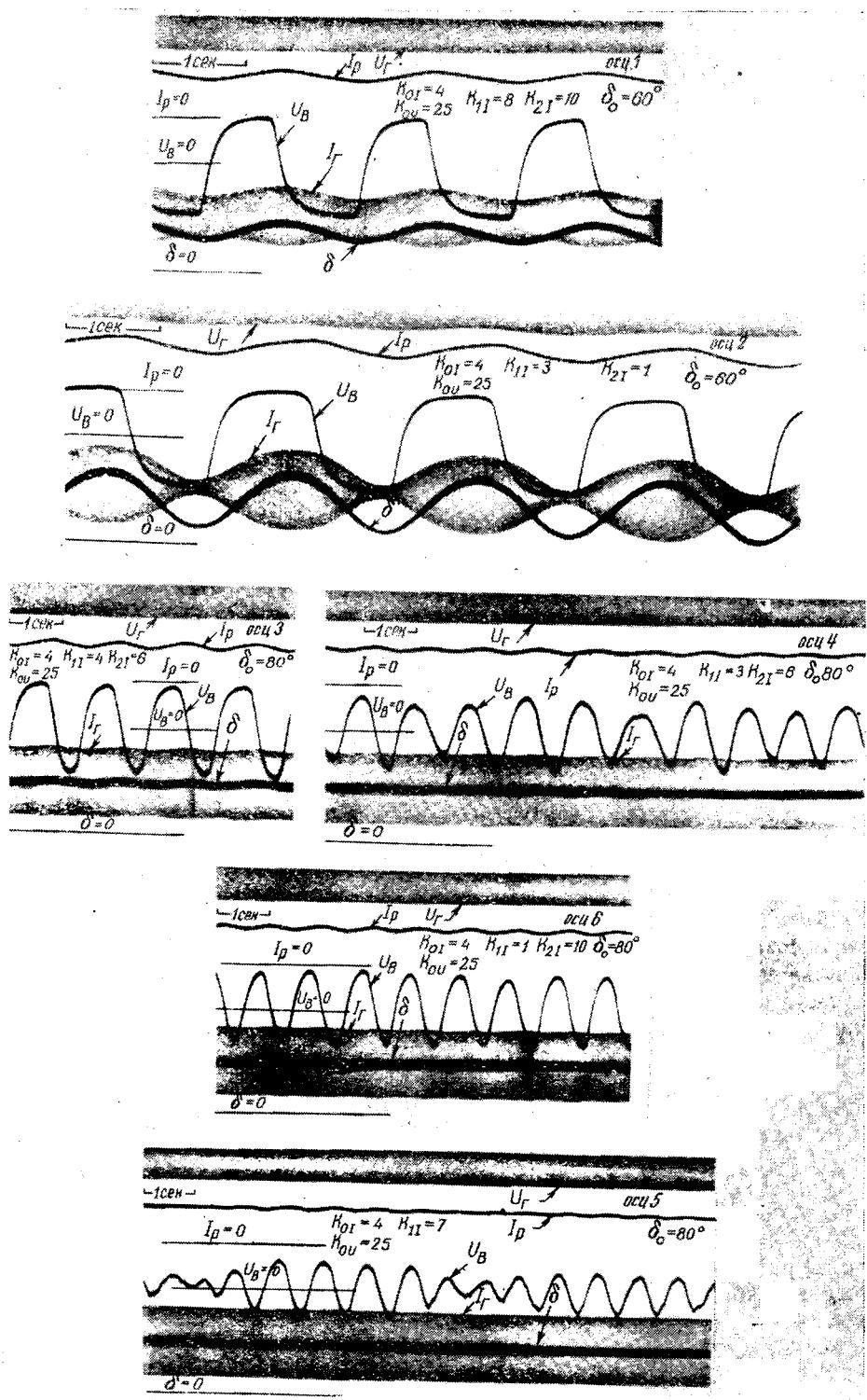


Рис. 4. Осциллограммы переходных процессов при различных настройках АРВ, указанных в делениях шкалы рис. 2.

Произведем гармоническую линеаризацию нелинейности

$$F(e_0 + a \sin \omega t) - F(e_0) \approx q(a) a \sin \omega t = q(a) \Delta e. \quad (3)$$

Коэффициент гармонической линеаризации может быть получен по следующему выражению [Л. 5]:

$$q(a) = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} [F(e_0 + a \sin \omega t) - F(e_0)] \sin \omega t d(\omega t).$$

Для указанной нелинейности  $q(a)$  будет монотонно убывающей функцией от  $a$ :

$$\begin{aligned} q(a) &\rightarrow 1; \quad q(a) \rightarrow 0; \quad \frac{dq(a)}{da} < 0. \\ a &\rightarrow 0; \quad a \rightarrow \infty \end{aligned}$$

Подставив выражения (2) и (3) в (1) и произведя простые преобразования, получим:

$$\left. \begin{aligned} &(-T_J \omega^2 + S + j\omega P_d) a_1 e^{j\varphi_1} + J a_2 e^{j\varphi_2} = 0; \\ &\left[ -j\omega T'_d N - \frac{q(a)(k_{0n} - \omega^2 k_{2n} + j\omega k_{1n})}{(1+j\omega T_e)(1+j\omega T_p)} \frac{\partial \Pi}{\partial \delta} \right] a_1 e^{j\varphi_1} + \\ &+ \left[ 1 + j\omega T'_d N - \frac{q(a)(k_{0n} - \omega^2 k_{2n} + j\omega k_{1n})}{(1+j\omega T_e)(1+j\omega T_p)} \times \right. \\ &\left. \times \frac{\partial \Pi}{\partial E_d} \right] a_2 e^{j\varphi_2} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Приравняв определитель этой системы нулю, получаем условие существования периодического решения с амплитудой  $a$  и частотой  $\omega$ :

$$\left. \begin{aligned} &- \omega^2 T_J + S + j\omega P_d \\ &- j\omega T'_d N - \frac{q(a) W(j\omega)}{(1+j\omega T_e)(1+j\omega T_p)} \frac{\partial \Pi}{\partial \delta} \\ &1 + j\omega T'_d N - \frac{q(a) W(j\omega)}{(1+j\omega T_e)(1+j\omega T_p)} \frac{\partial \Pi}{\partial E_d} \end{aligned} \right| = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) при заданных  $k_{1n}$  и  $k_{2n}$  относительно  $a$  и  $\omega$  оказывается достаточно трудным, поэтому в дальнейшем можно поступить следующим образом.

Будем задаваться амплитудой  $a$  и частотой  $\omega$  периодического решения и искать значения  $k_{1n}$  и  $k_{2n}$ , соответствующие принятому периодическому решению точно так же, как определяются границы  $D$ -разбиения при нахождении областей устойчивости.

Уравнение (5) при приравнивании нулю действительной и мнимой частей определителя распадается на два:

$$\left. \begin{aligned} X &= X[q(a) k_{1n}, q(a) k_{2n}, q(a) k_{0n}, \omega] = 0; \\ Y &= Y[q(a) k_{1n}, q(a) k_{2n}, q(a) k_{0n}, \omega] = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Так как  $k_{1n}$  и  $k_{2n}$  входят в члены, стоящие в одной строке определителя (уравнение 5), то  $X$  и  $Y$  являются линейными функциями величин  $k_{1n}$  и  $k_{2n}$ . Поэтому система уравнений (6) достаточно просто решается относительно  $k_{1n}$  и  $k_{2n}$ . Подставляя в полученные параметрические уравнения для  $k_{1n}$  и  $k_{2n}$  значения  $\omega$  от  $-0$  до  $+\infty$  при определенном  $q(a)$ , соответствующем заданной величине  $a$ , получим на плоскости  $k_{2n}$ ,  $k_{1n}$  кривые равных амплитуд периодических решений  $e$ . При  $a=0$ ,  $q(a)=1$  система уравнений (6) переходит в уравнения  $D$ -разбиения плоскости  $k_{1n}$ ;  $k_{2n}$ .

Пусть получены параметрические уравнения кривой  $D$ -разбиения в виде:

$$\left. \begin{aligned} k_{1n}^{(0)} &= F_1(k_{0n}, \omega); \\ k_{2n}^{(0)} &= F_2(k_{0n}, \omega), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где индекс «ноль» указывает, что  $k_{1n}$  и  $k_{2n}$  соответствуют значениям, лежащим на кривой  $D$ -разбиения.

В силу того что коэффициент гармонической линеаризации  $q(a)$  входит в уравнения (6) только в виде произведения с  $k_{0n}$ ,  $k_{1n}$  и  $k_{2n}$ , значения  $k_{1n}^{(1)}$  и  $k_{2n}^{(1)}$ , при которых существуют периодические решения с амплитудой  $a^{(1)}$  и частотой  $\omega$ , можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} q(a^{(1)}), k_{1n}^{(1)} &= F_1[k_{0n} q(a^{(1)}), \omega]; \\ q(a^{(1)}), k_{2n}^{(1)} &= F_2[k_{0n} q(a^{(1)}), \omega] \end{aligned}$$

или

$$\left. \begin{aligned} k_{1n}^{(1)} &= \frac{1}{q(a^{(1)})} F_1[k_{0n} q(a^{(1)}), \omega]; \\ k_{2n}^{(1)} &= \frac{1}{q(a^{(1)})} F_2[k_{0n} q(a^{(1)}), \omega]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Система уравнений (8) представляет собой параметрические уравнения кривой равных амплитуд периодических решений  $e$ :  $k_{1n}=f(k_{2n})$  при  $a=a^{(1)}$ .

Задаваясь различными значениями  $a$ :  $a^{(1)}$ ,  $a^{(2)}$  и т. д., можно получить серию таких кривых.

Если изменение коэффициента регулирования  $k_{0n}$  несущественно влияет на положение границы области устойчивости (как показали расчеты в интересующих нас диапазонах изменения  $k_{0n}$ ), такое предположение достаточно точно для  $\omega > 4$  и дает несущественную ошибку при меньших  $\omega$ ), то можно дать достаточно простой способ построения кривых равных амплитуд периодических решений  $e$ .

Если

$$\left. \begin{aligned} F_1(k_{0n}, \omega) &\approx F_1[k_{0n} q(a), \omega]; \\ F_2(k_{0n}, \omega) &\approx F_2[k_{0n} q(a), \omega], \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

то, как видно из сравнения уравнений (7) и (8),

$$\left. \begin{aligned} k_{1n}^{(1)} &= \frac{1}{q(a^{(1)})} k_{1n}^{(0)}; \\ k_{2n}^{(1)} &= \frac{1}{q(a^{(1)})} k_{2n}^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Уравнения (10) показывают, что кривые равных амплитуд периодических решений  $e$  могут быть получены (рис. 7) из границы области статической устойчивости преобразованием подобия с центром в начале координат и коэффициентом подобия  $\frac{1}{q(a)}$ .

При непрерывном увеличении  $a$  кривые равных амплитуд периодических решений, получаемые преобразованием подобия, будут в соответствии с изменением  $q(a)$  непрерывно перемещаться на плоскости  $k_{2n}$ ,  $k_{1n}$ , располагаясь между лучами  $044'$  и  $099'$  и частью границы области устойчивости (91234).

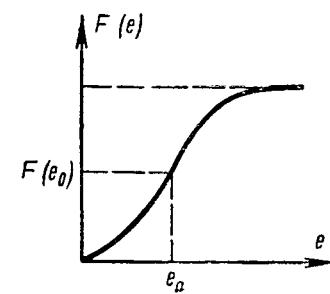
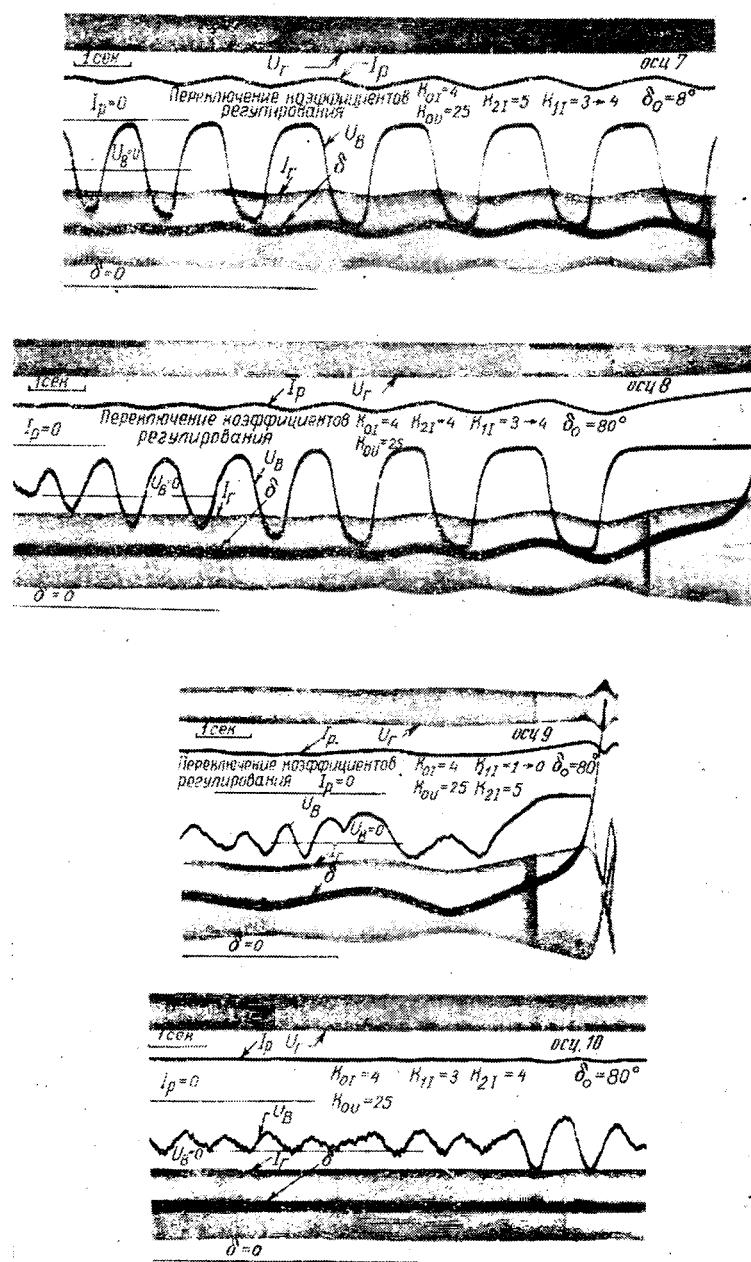


Рис. 6. Вид нелинейности силового блока системы возбуждения.

$e_0$  — начальное, невозмущенное значение напряжения на входе силового блока.

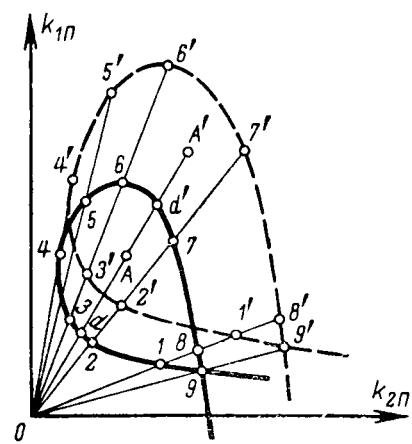


Рис. 7. Построение кривой равных амплитуд периодических решений преобразованием подобия.

Условные обозначения:

- кривая  $D$ -разбиения;
- кривая равных амплитуд периодических решений;
- $0\bar{8}$  — длина отрезка между точками 0, 8;  $0\bar{8}'$  — длина отрезка между точками 0, 8'.

Рис. 5. Осциллограммы переходных процессов при различных настройках АРВ, указанных в делениях шкалы рис. 2.

Вне границы (91234) области устойчивости периодических решений не существует. Внутри области устойчивости существует одно периодическое решение. Вне границы (456789) существует два периодических решения.

В самом деле, для точки  $A$  (произвольная точка внутри области устойчивости) можно найти только одно значение  $q(a)$ , а следовательно, и  $a$ , при котором бы соблюдались условия (10). При этом

$$q(a) = \frac{\overline{od}}{\overline{oA}},$$

$\overline{od}$ ,  $\overline{oA}$  — длины отрезков между соответствующими точками.

Для точки  $A'$  (произвольная точка вне области статической устойчивости между лучами 044' и

099') можно найти два значения  $q(a)$ , а следовательно, и  $a$ , при которых соблюдаются условия (10).

Первое с амплитудой  $a^{(1)}$ :

$$q(a^{(1)}) = \frac{\overline{od'}}{\overline{oA'}}$$

и второе с амплитудой  $a^{(2)}$ :

$$q(a^{(2)}) = \frac{\overline{od}}{\overline{oA'}}$$

**Исследование устойчивости периодических решений.** Кривые равной амплитуды периодических решений, построенные в плоскости коэффициентов регулирования по производным, либо решением параметрических уравнений (7), либо преобразованием подобия (10) определяют лишь условия существования, но не дают ответа на вопрос об устойчивости периодических решений. Исследова-

ние устойчивости периодических решений в настоящей работе проводится с использованием приближенного критерия, предложенного Е. П. Поповым [Л. 5]:

$$\frac{\partial X}{\partial a} \frac{\partial Y}{\partial \omega} - \frac{\partial X}{\partial \omega} \frac{\partial Y}{\partial a} > 0, \quad (12)$$

где  $X$  и  $Y$  определяются уравнениями (6) для  $\omega = \omega_n$  — частоты периодического решения заданной точки кривой периодического решения с амплитудой  $a$ .

Смысл этого критерия заключается в следующем. Рассматривается система с параметрами, учитывающими гармонически линеаризованные нелинейности, являющимися функциями амплитуды периодического решения  $a$ . Строится кривая Михайлова, которая при частоте  $\omega_n$  проходит через начало координат. Записанное неравенство означает, что периодическое решение устойчиво, если кривая Михайлова при увеличении амплитуды периодического решения охватывает начало координат, а при уменьшении не охватывает.

Это соответствует переходному процессу с затуханием колебаний при увеличении амплитуды  $a$  и увеличением колебаний при уменьшении амплитуды  $a$ . В этом случае переходный процесс с обеих сторон сходится к исследуемому периодическому процессу с амплитудой  $a$ , т. е. он устойчив.

Выполнение условия (12) устойчивости периодического решения в нашей задаче можно проверить без построения кривых Михайлова, применив следующее рассуждение.

Рассмотрим (рис. 7) совокупность периодических решений, соответствующих настройкам, полученным отображением части границы (456789) (точки 4 и 9 не включаются). Пусть периодические решения имеют амплитуду первой гармоники, равную  $a^{(1)}$ . Настройки, соответствующие этим решениям, обозначим через  $k_{1n}^{(1)}$  и  $k_{2n}^{(1)}$ .

Так как  $q(a^{(1)})k_{1n}^{(1)} = k_{1n}^{(0)}$ ,  $q(a^{(1)})k_{2n}^{(1)} = k_{2n}^{(0)}$ , то кривая Михайлова для амплитуды периодического решения  $a^{(1)}$  при  $\omega = \omega_n$  будет проходить через начало координат.

Дадим приращение амплитуде колебаний  $a^{(1)} + \Delta a$ , тогда в силу монотонности

$$q(a^{(1)} + \Delta a) < q(a^{(1)}).$$

Поэтому

$$k_{1n}^{(1)}q(a^{(1)} + \Delta a) < k_{1n}^{(1)}q(a^{(1)}),$$

$$k_{2n}^{(1)}q(a^{(1)} + \Delta a) < k_{2n}^{(1)}q(a^{(1)}),$$

т. е. настройка

$$k_{1n}^{(1)}q(a^{(1)} + \Delta a), k_{2n}^{(1)}q(a^{(1)} + \Delta a)$$

лежит внутри области устойчивости (рис. 7). Поэтому кривая Михайлова при амплитуде колебаний  $a^{(1)} + \Delta a$  охватывает начало координат.

Рассмотрим колебания с амплитудой  $a^{(1)} - \Delta a$ .

$$q(a^{(1)} - \Delta a) > q(a^{(1)});$$

$$k_{1n}^{(1)}q(a^{(1)} - \Delta a) > k_{1n}^{(1)}q(a^{(1)});$$

$$k_{2n}^{(1)}q(a^{(1)} - \Delta a) > k_{2n}^{(1)}q(a^{(1)}),$$

т. е. настройка

$$k_{1n}^{(1)}q(a^{(1)} - \Delta a), k_{2n}^{(1)}q(a^{(1)} - \Delta a)$$

при  $a^{(1)} - \Delta a$  лежит вне области устойчивости, и кривая Михайлова не охватывает начало координат.

Таким образом, периодические решения, соответствующие отображению границы устойчивости (456789), устойчивы, так как при увеличении амплитуды колебаний кривая Михайлова охватывает начало координат, а при уменьшении — не охватывает.

Аналогичными рассуждениями можно показать, что периодические решения, соответствующие отображению части границы (91234), неустойчивы.

На основе проведенного анализа существования и устойчивости периодических решений вблизи границы области устойчивости можно произвести разделение исследуемой границы на опасную и безопасную.

Участок границы устойчивости (91234) — опасный, так как при нарушении этой границы периодических решений не существует (происходит непрерывное нарастание колебаний), внутри области устойчивости вблизи этой границы существует одно неустойчивое периодическое решение, соответствующее неустойчивому предельному циклу.

При нарушении границы (456789) существуют два периодических решения, одно из них (меньшее) устойчиво: оно соответствует отображению границы (456289), другое — неустойчиво. Таким образом, при нарушении указанной границы в системе возникают автоколебания. Поэтому участок границы устойчивости (456789) — безопасный.

Точки 4 и 9 являются точками, разделяющими опасную границу устойчивости от безопасной. Для отыскания их следует из начала координат пройти две касательные к области устойчивости. Точки касания будут искомыми 4 и 9.

Для уточнения проведенного разделения границ следует проверить принятые предположение о малости колебаний угла и э. д. с. вблизи безопасной границы. С этой целью для полученного периодического решения  $\Delta e = a \sin \omega t$  при определенной настройке  $k_{1n}$ ,  $k_{2n}$  надо вычислить амплитуды колебаний угла и э. д. с. по следующим выражениям, вытекающим из решения первого и четвертого уравнений системы (1):

$$a_1 e^{j\varphi_1} = \frac{a J (1 + j\omega T_p)}{W(j\omega) \left[ (-T_J \omega^2 + S + j\omega P_d) \frac{\partial \Pi}{\partial E_d} - J \frac{\partial \Pi}{\partial \delta} \right]},$$

$$a_2 e^{j\varphi_2} = \frac{a (1 + j\omega T_p) (-T_J \omega^2 + S + j\omega P_d)}{W(j\omega) \left[ (-T_J \omega^2 + S + j\omega P_d) \frac{\partial \Pi}{\partial E_d} - J \frac{\partial \Pi}{\partial \delta} \right]}.$$

Анализ записанных выражений показывает, что при заданной амплитуде  $a$  величины  $a_1$  и  $a_2$  убывают при возрастании частоты  $\omega$ , этому отвечает перемещение по кривой  $k_{1n} = f(k_{2n})$  в сторону больших значений  $k_{2n}$ . Поэтому такое уточнение приводит к перемещению точки соприкосновения опасной и безопасной границ вдоль границы устойчивости в сторону больших частот. Вместе с тем, как показали эксперименты и уточненные расчеты, метод

преобразования подобия дает достаточно хорошее приближение для оценки участков опасных и безопасных границ.

**Выводы.** 1. Для повышения надежности работы электрической системы при изменении режимов и параметров и увеличении устойчивости при конечных возмущениях целесообразно выбирать настройку АРВ сильного действия вблизи безопасной границы области устойчивости.

Нарушение безопасной границы приводит к автоколебаниям, при которых в случае их допустимой амплитуды система оказывается практически устойчивой. Работа системы с настройкой АРВ внутри области устойчивости вблизи опасной границы может привести к нарушению устойчивости при конечных возмущениях, имеющих место в процессе эксплуатации реальной системы.

2. Опасная граница лежит в диапазоне меньших частот (нижний левый участок), безопасная — в диапазоне больших частот (верхний правый участок) границы области статической устойчивости.

3. В статье предлагается упрощенная методика разделения границы области статической устойчивости, построенной в координатах коэффициентов регулирования по производным АРВ сильного действия, на безопасную и опасную. Показано, что при сделанных допущениях она совпадает с разделением границ по знаку ляпуновской величины. Экспериментальная проверка показала достаточную для практики точность предлагаемого приближенного метода.

**Приложение.** Покажем, что если допустить симметричность функции  $F(e)$  относительно исходного режима, то разделение границ устойчивости на опасные и безопасные на основе исследования устойчивости периодических решений при помощи приближенного критерия (12) совпадает с разделением границ по знаку ляпуновской величины.

Для этого предварительно получим выражение для знака ляпуновского коэффициента на границе устойчивости.

Затем покажем, что условие устойчивости для периодических решений, получаемых на бесконечно близкой к границе устойчивости кривой периодических решений (т. е. при  $\alpha \rightarrow 0$ ,  $q(a) \rightarrow 1$ ) точно совпадает с условием отрицательности ляпуновской величины.

**Вычисление ляпуновской величины.** Представим выражение  $F(e_0 + \Delta e) - F(e_0)$  в следующем виде:

$$F(e_0 + \Delta e) - F(e_0) = c_1 \Delta e + c_3 \Delta e^3 + \dots$$

В нашем случае

$$c_1 = 1; \quad c_3 < 0.$$

Заметим, что  $\frac{dq(a)}{da} < 0$  и, следовательно,  $\text{sign } \frac{dq(a)}{da} = \text{sign } c_3$ .

Характеристическое уравнение линеаризованной по первому приближению системы запишем в виде (6):

$$\Delta(j\omega) = D(j\omega) + c_3 N(j\omega).$$

При этом ляпуновская величина  $\lambda$  будет иметь вид:

$$\lambda = \frac{c_3}{c_1} \left| \frac{1}{\frac{d\Omega(j\omega)}{d\omega}} \right| \sin \gamma(\omega), \quad (\Pi,1)$$

где  $\gamma(\omega)$  фаза вектора  $\frac{d\Omega(j\omega)}{d\omega}$  в точке  $\omega = \omega_0$ ,  $\Omega(j\omega_0) = -1$ , а  $\Omega(j\omega) = \frac{N(j\omega)}{D(j\omega)}$ .

Учитывая, что существенен только знак  $\lambda$ , можно записать:

$$\lambda \equiv c_3 I_m \left[ \frac{d\Omega(j\omega)}{d\omega} \right]. \quad (\Pi,2)$$

Представим  $\Omega(j\omega)$  в виде:

$$\begin{aligned} \Omega(j\omega) &= \frac{N(j\omega)}{D(j\omega)} = \frac{r_N(\omega) + jg_N(\omega)}{r_d(\omega) + jg_d(\omega)} = \\ &= \frac{r_N(\omega)r_d(\omega) + g_d(\omega)g_N(\omega)}{r_d^2(\omega) + g_d^2(\omega)} + \\ &\quad + j \frac{r_d(\omega)g_N(\omega) - r_N(\omega)g_d(\omega)}{r_d^2(\omega) + g_d^2(\omega)}. \end{aligned}$$

В точке  $\omega = \omega_0$  имеем согласно условию  $\Omega(j\omega_0) = -1$ :

$$\begin{aligned} r_d(\omega_0)g_N(\omega_0) - r_N(\omega_0)g_d(\omega_0) &= 0, \\ r_N(\omega_0) &= -r_d(\omega_0)g_N(\omega_0) = -g_d(\omega_0). \end{aligned}$$

Вычислим  $I_m \left[ \frac{d\Omega(j\omega)}{d\omega} \right]_{\omega=\omega_0}$ :

$$\begin{aligned} I_m \left[ \frac{d\Omega(j\omega)}{d\omega} \right] &= \frac{d}{d\omega} [I_m \Omega(j\omega)] = \\ &= \frac{[r_d(\omega)g_N(\omega) - r_N(\omega)g_d(\omega)]}{r_d^2(\omega) + g_d^2(\omega)} - \\ &\quad - [r_d(\omega)g_N(\omega) - r_N(\omega)g_d(\omega)] \frac{[r_d^2(\omega) + g_d^2(\omega)]'}{[r_d^2(\omega) + g_d^2(\omega)]^2}. \end{aligned}$$

В точке  $\omega = \omega_0$  второй член этого выражения равен нулю. Поэтому

$$J_m \left[ \frac{d\Omega(j\omega)}{d\omega} \right] = \frac{r'_d(\omega)g_N(\omega) + r'_d(\omega)g'_N(\omega) - r'_N(\omega)g_d(\omega) - r_N(\omega)g'_d(\omega)}{r_d^2(\omega) + g_d^2(\omega)}.$$

Отбросив несущественные положительные множители, получим:

$$\lambda \equiv c_3 [r'_d(\omega)g_N(\omega) + r_d(\omega)g'_N(\omega) - r'_N(\omega)g_d(\omega) - r_N(\omega)g'_d(\omega)].$$

Учитывая соотношения

$$r_N(\omega) = -r_d(\omega); \quad g_N(\omega) = -g_d(\omega), \quad \text{sign } c_3 = \text{sign } \frac{dq(a)}{da},$$

для безопасной границы имеем условие  $\lambda < 0$  в следующем виде:

$$\frac{dq(a)}{da} [r_N(\omega)g'_d(\omega) + r'_N(\omega)g_N(\omega) - r'_d(\omega)g_N(\omega) + \dots] > 0. \quad (\Pi,3)$$

Вычислим критерий (12) для периодических решений, лежащих на кривых равных амплитуд периодических решений, бесконечно близких к границе устойчивости.

Найдем выражения для величин  $X$  и  $Y$ , входящих в неравенство (12).

Так как в гармонически линеаризованных уравнениях вместо  $c$  входит  $q(a)$ , то, очевидно, «характеристическое» уравнение гармонически линеаризованной системы будет следующим:

$$D(j\omega) + q(a)N(j\omega) = r_d(\omega) + jg_d(\omega) + q(a)[r_N(\omega) + jg_N(\omega)].$$

При этом выражения для  $X$  и  $Y$  примут вид:

$$\begin{aligned} X &= r_d(\omega) + q(a)r_N(\omega); \\ Y &= g_d(\omega) + q(a)g_N(\omega); \end{aligned}$$

$$\frac{\partial X}{\partial \omega} = r'_d(\omega) + q(a)r'_N(\omega); \quad \frac{\partial X}{\partial a} = \frac{dq(a)}{da} r_N(\omega);$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \omega} = g'_d(\omega) + q(a)g'_N(\omega); \quad \frac{\partial Y}{\partial a} = \frac{dq(a)}{da} g_N(\omega).$$

# Характеристики процесса истечения воздуха в дугогасителе воздушного выключателя

Г. А. КУКЕКОВ

Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина

В дугогасительных камерах с продольным воздушным дутьем, применяемых в современных воздушных выключателях переменного тока высокого напряжения, при гашении дуги наблюдается сложный комплекс взаимосвязанных физических процессов.

Наиболее характерными из них являются:

- горение дуги в потоке сжатого воздуха (газа);
- истечение воздуха через рабочие каналы (сопла) дугогасителя в зоне горения дуги;
- процесс распада остаточного ствола дуги в конце каждой полуволны переменного тока дуги и последующее восстановление электрической прочности межконтактного промежутка (при условии невозобновления).

Характер протекания этих процессов в отдельные стадии гашения главным образом определяется геометрическими параметрами дугогасителя и исходным состоянием дугогасящей среды — сжатого воздуха (или какого-либо другого газа).

Важное значение имеет исследование процесса истечения воздуха через рабочие объемы и каналы дугогасителя во время гашения дуги переменного тока.

Как известно, с электрической дугой в потоке газа связан термодинамический эффект, сущность которого состоит в том, что при некоторых характеристиках для данных устройств условиях скорость течения на входе в дугогасительное сопло может значительно снижаться (в пределе до нуля), если давление воздуха в камере и сечение горловины сопла малы, а мощность, выделяющаяся в дуге, чрезмерно велика.

Значительное затормаживание потока при амплитудном значении тока дуги может отрицательно

влиять на ход последующих процессов — распад остаточного ствола дуги и восстановление электрической прочности промежутка в конце рассматриваемого полупериода.

Этим в основном и ограничивается отключающая способность дугогасителя по предельной максимальной величине отключаемого тока.

Изучению и расчетам термодинамического эффекта в дугогасителях воздушных выключателей посвящен ряд работ [Л. 1—7].

В настоящей статье даются дальнейшее развитие теории и приближенные методы расчета характеристик процесса истечения воздуха в камере продольного дутья, а также приводятся описание и результаты опытных исследований данного процесса, проведенных в лаборатории электрических аппаратов ЛПИ им. М. И. Калинина [Л. 8].

Теория и расчет процесса истечения газа через сопло при наличии в нем электрической дуги. Рассматривается система, изображенная на рис. 1, а.

Поток газа, протекающий через сопло, нагревается за счет тепла, поступающего от ствола дуги.

В общем случае картина течения может быть весьма сложной, так как условия теплообмена между отдельными коаксиальными слоями потока и дугой неодинаковы. Вместе с тем, как показали опыты, в случае отключения максимальных, предельных для данного устройства значений тока аксиальное расположение ствола в потоке нарушается. При этом происходит «перемешивание» холодных и более нагретых слоев газа, в результате чего создается условие более равномерного распределения поступающего от дуги тепла по всему сечению потока.

Указанное позволяет в первом приближении принять для дальнейших выводов упрощенную

Неравенство (12) при подстановке полученных значений будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dq(a)}{da} \{ r_N(\omega) g'_a(\omega) + q(a) r_N(\omega) g'_N(\omega) - r'_a(\omega) g_N(\omega) - q(a) g_N(\omega) r'_N(\omega) \} > 0.$$

При  $a \rightarrow 0$ ;  $q(a) \rightarrow 1$  получаем:

$$\frac{dq(a)}{da} \{ r_N(\omega) q'_a(\omega) + r_N(\omega) g'_N(\omega) - r'_a(\omega) g_N(\omega) - g_N(\omega) r'_N(\omega) \} > 0. \quad (\text{П.4})$$

Сравнение уравнений (П.3) и (П.4) показывает, что разделения границ на опасные и безопасные при помощи знака ляпуновской величины и на основе исследования устойчивости периодических решений совпадают.

## Литература

- Баутин Н. Н., Поведение динамических систем вблизи границ областей устойчивости, ГИТТЛ, 1949.
- Хан Чжень-сян, Влияние малых и конечных возмущений на поведение сложных автоматических регулируемых электрических систем, Автореферат докторской диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, 1961.
- Литкенс И. В., Исследование некоторых вопросов технической устойчивости автоматически регулируемой электрической системы, Доклад 4-й межвузовской конференции по применению физического и математического моделирования в различных отраслях техники, Москва, 1962.
- Попов Е. П. и Пальтов И. П., Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем, ГИМФД, 1960.
- Попов Е. П., Динамика систем автоматического регулирования, ГИТТЛ, 1954.
- Лурье А. И., Некоторые нелинейные задачи теории автоматического регулирования, ГИТТЛ, 1951.

[7.9.1963]



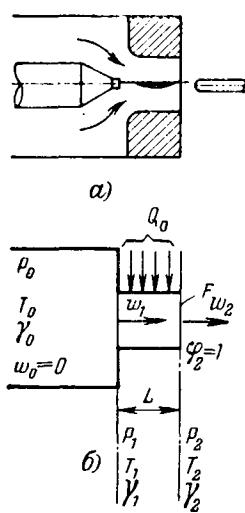


Рис. 1. Схема для расчета термодинамического эффекта.

а — схема; б — модель системы.

сокращаются. Это можно видеть из известного уравнения удельного расхода

$$\frac{G}{F} = \gamma_1 w_1 = \gamma_2 w_2,$$

если принять во внимание, что по мере увеличения подогрева плотность  $\gamma_2$  падает значительно быстрее, чем возрастает критическая скорость  $C_{\text{кр2}}$ , а плотность  $\gamma_1$  холодного газа не зависит от подогрева.

Таким образом, подвод даже сколь угодно малого количества тепла к потоку холодного газа, имеющему начальную критическую скорость, должен вызвать снижение скорости  $w_1$  на входе, соответствующее количеству подведенного тепла.

В дугогасителях воздушных выключателей давление воздуха принимается таким, что при отсутствии дуги всегда обеспечивается критическая (надkritическая) скорость холодного воздуха.

Поэтому во время отключения появление в потоке газа электрической дуги неизбежно вызывает снижение скорости  $w_1$ ; при любом значении тока дуги система работает в режиме теплового кризиса.

В соответствии с принятыми допущениями в дальнейших выводах рассматривается квазистационарное одномерное течение газа, характеризуемое системой известных уравнений:

$$w_1 \gamma_1 = w_2 \gamma_2; \quad (1)$$

$$p_1 - p_2 = \gamma_1 w_1 (w_2 - w_1); \quad (2)$$

$$\frac{p_1}{\gamma_1 T_1} = \frac{p_2}{\gamma_2 T_2}; \quad (3)$$

$$Q = C_p (T_{02} - T_{01}) = C_p (T_2 - T_1) + \frac{A}{2g} (w_2^2 - w_1^2). \quad (4)$$

В этих уравнениях  $A$  — тепловой эквивалент механической работы;

$C_p$  — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении;

картину одномерного потока, нагреваемого равномерно по всей длине.

Приближенная модель такой системы, изображенная на рис. 1,б, представляет собой так называемое тепловое сопло [Л. 9 и 10].

Характерной особенностью этой системы является то, что при любой сколь угодно малой скорости  $w_1$  входа холодного газа можно за счет подвода тепла к потоку поднять скорость  $w_2$  в подогреваемом потоке на наружном срезе сопла до критической величины, что будет соответствовать состоянию так называемого теплового кризиса.

При таком состоянии расход газа и скорость  $w_1$  на входе по сравнению с расходом при истечении без подогрева

сокращаются. Это можно видеть из известного уравнения удельного расхода

$T_{01}$ ,  $T_{02}$  — температуры торможения потока соответственно на входе и на наружном срезе сопла;

$T_1$  и  $T_2$  — статическая температура газа;

$Q$  — количество подводимого от дуги тепла в единицу времени, отнесенное к единице веса газа.

В рассматриваемом нами случае можно считать

$$Q = \frac{\epsilon}{w_1}, \quad (5)$$

где

$$\epsilon = \frac{2,4 \cdot 10^{-4} U_d i_d}{\gamma_1 F} \left[ \frac{\text{ккал} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{сек}} \right];$$

$U_d$  — напряжение на эффективной части ствола дуги, в;

$i_d$  — ток дуги, а;

$F$  — сечение сопла, м<sup>2</sup>.

По условиям работы значение скорости  $w_1$  не может превосходить значения звуковой скорости, поэтому можно принять

$$T_{01} = T_1.$$

Тогда уравнение (4) принимает вид:

$$\frac{\epsilon}{w_1} \approx C_p (T_{02} - T_1) \quad (6)$$

и после простых преобразований будем иметь:

$$\frac{T_{01}}{T_{02}} = \frac{\Psi_0}{w_1} + 1, \quad (7)$$

где

$$\Psi_0 = \frac{\epsilon}{T_1 C_p} = \frac{2,4 \cdot 10^{-4} U_d i_d R}{F C_p p_1}; \quad (8)$$

$R$  — газовая постоянная.

Решение системы уравнений (1), (2), (3) и (4) относительно скорости (в нашем случае  $\varphi_2 = \frac{w_2}{C_{\text{кр2}}} = 1$ ) может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{w_1}{w_2} = 1 - \sqrt{1 - \frac{T_{01}}{T_{02}}}. \quad (9)$$

Совместное решение уравнений (7) и (9) после ряда преобразований дает:

$$\Psi_0 = \frac{C_{\text{кр1}}}{4} \frac{\varphi_1^4 - 2\varphi_1^2 + 1}{\varphi_1} \quad [\text{м/сек}], \quad (10)$$

где  $\varphi_1 = \frac{w_1}{C_{\text{кр1}}}$  — относительная скорость потока на входе;

$C_{\text{кр1}} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} g R T_{01}}$  — критическая скорость холодного газа.

На основании известного соотношения

$$\frac{N_0}{p_0 F} = 4,18 \frac{C_p}{R} \Psi_0, \quad (11)$$

где  $N_0 = U_d i_d \cdot 10^{-3}$  — поступающая от дуги мощность в квт, расчетным путем можно получить искомую зависимость скорости потока на входе от мощности дуги, давления в камере и площади поперечного сечения сопла:

$$w_1 = f \left( \frac{N_0}{p_0 F} \right). \quad (12)$$

Такая зависимость для случая истечения воздуха представлена на рис. 2.

Подобного рода кривая может быть получена и для других газов.

Уравнение (12) можно также получить приближенно в явном виде.

Для некоторых пределов изменения скорости  $w_1$ , не внося заметной погрешности, уравнение (10) можно существенно упростить. Например, для  $w_1 \leq 70 \text{ м/сек}$  наибольшее значение относительной скорости  $\varphi_1$  составит всего лишь  $\varphi_1 \approx 0,2$ . С достаточной точностью при этом уравнение (10) может быть приведено к виду:

$$\Psi_0 = \frac{C_{kp1}}{4\varphi_1}, \quad (13)$$

откуда

$$w_1 = \frac{C_{kp1}^2}{4\Psi_0} = 3,58 \cdot 10^{-2} C_{kp1}^2 C_p \frac{p_0 F}{N_0}. \quad (14)$$

Для холодного воздуха ( $T_1 = 293^\circ \text{K}$ ) уравнение (14) имеет вид:

$$w_1 = 860 \frac{p_0 F}{N_0} [\text{м/сек}]. \quad (15)$$

В этом уравнении

$$|p_0| = |amu|; |F| = |cm^2|; |N_0| = |kwt|.$$

Остальная часть кривой рис. 2 для пределов изменения скорости  $70 \text{ м/сек} < w_1 \leq 333 \text{ м/сек}$  может быть охарактеризована уравнением

$$w_1 = 333 - 110 \sqrt[3]{\frac{N_0}{p_0 F}} [\text{м/сек}]. \quad (16)$$

При переменном синусоидальном токе дуги в течение каждого полупериода скорость  $w_1$  должна меняться во времени.

При нулевых значениях тока она достигает значений критической скорости; при амплитуде тока она снижается до некоторой минимальной скорости

$$w_{1\min} = 860 \frac{p_0 F}{U_d I_m}, \quad (17)$$

где  $I_m$  — амплитуда тока,  $a$ .

Для других значений тока она будет меняться соответственно уравнениям (15) или (16) по закону:

для  $w_1 \leq 70 \text{ м/сек}$

$$w_1 = 860 \frac{p_0 F}{U_d I_m \sin \omega t}; \quad (18)$$

для  $70 \text{ м/сек} < w_1 \leq 333 \text{ м/сек}$

$$w_1 = 333 - 110 \sqrt[3]{\frac{U_d I_m \sin \omega t}{p_0 F}} \approx \\ \approx 333 - 110 \sqrt[3]{\frac{\omega U_d I_m}{p_0 F}} \sqrt[3]{t}. \quad (19)$$

При отключении больших токов (порядка десятка килоампер) уравнение (18) справедливо для подавляющей части полупериода, за исключением весьма малых отрезков времени в начале и в конце полупериода, измеряемых долями миллисекунды.

Следует заметить, что при интенсивном гашении дуги ток дуги в конце полупериода меняется более быстро, чем по синусоидальному закону. Соответственно изменение скорости  $w_1$  в конце полу-

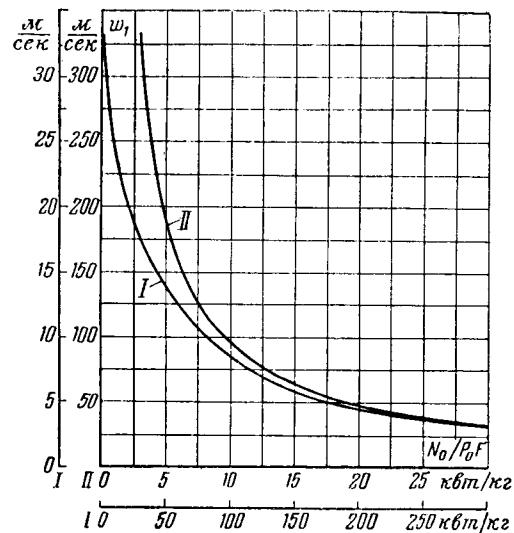


Рис. 2. Расчетная кривая скорости истечения воздуха через цилиндрическое сопло при тепловом кризисе.

периода происходит также более интенсивно, чем это следует из уравнения (19).

Данная особенность приближенно может быть учтена путем увеличения в  $K_f$  раз угловой частоты  $\omega$  в уравнении (19), т. е.

$$w_1 = 333 - 110 \sqrt[3]{\frac{K_f \omega U_d I_m}{p_0 F}} \sqrt[3]{t}. \quad (20)$$

Выведенные уравнения позволяют определять расчетные данные, необходимые для конструирования дугогасителей с продольным воздушным дутьем. В частности, на основании уравнения (17) может быть найдено минимальное сечение дутьевого сопла при заданной минимальной скорости  $w_1$  и заданных значениях  $I_m$ ,  $U_d$  и  $p_0$ .

**Опытные исследования.** Исследования имели целью установить опытным путем предельное минимальное значение скорости  $w_{1\min}$ , определяемое по уравнению (17), для дугогасителей с продольным воздушным дутьем, имеющих различные конфигурации и размеры дутьевых сопел.

Предусматривалось также более детальное исследование вопроса, каков внешний видимый характер проявления в таком устройстве термодинамического эффекта в отдельные стадии гашения дуги.

В соответствии с поставленной задачей наиболее приемлемой оказалась методика многополупериодного гашения дуги в цепи колебательного контура промышленной частоты.

Благодаря затуханию колебаний тока в контуре при горении исследуемой дуги в ходе одного опыта могут быть получены данные о характере горения дуги в течение ряда полупериодов при различных амплитудах тока до момента ее погасания, т. е. до наступления условий невозобновления.

Принципиальная схема опытной установки дана на рис. 3.

В качестве источника мощности использован колебательный контур проф. А. А. Горева. Выбранные параметры контура и величина начального на-

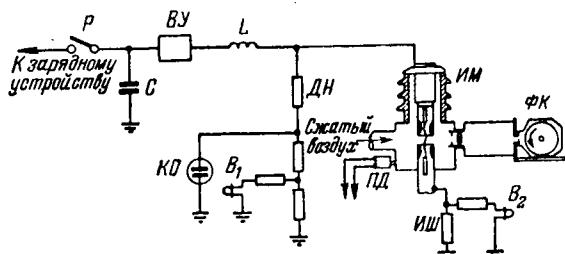


Рис. 3. Принципиальная схема установки для исследования дуги в дугогасителе с продольным воздушным дутьем.  
 $L$ ,  $C$  — индуктивность и емкость колебательного контура;  $VU$  — включающее устройство;  $IM$  — испытуемый макет;  $FK$  — фотокамера;  $PD$  — преобразователь давления;  $DN$  — делитель напряжения;  $IS$  — измерительный шунт.

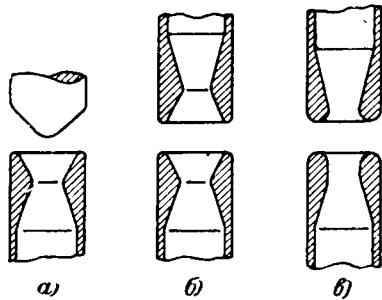


Рис. 4. Контактные системы с коническими соплами.  
 $a$  — одностороннего дутья;  $b$ ,  $c$  — двустороннего дутья.

прежения на емкости позволяли получить амплитуду первой полуволны тока около 10 ка и величину возвращающегося напряжения в конце первого полупериода тока около 25 кв.

Опыты проводились на специальном макете дугогасителя, в котором устанавливались контакты и сопла различных размеров и конфигураций. Возбуждение дуги осуществлялось путем пережигания тонкой плавкой вставки.

В течение каждого опыта заданная величина давления воздуха в камере поддерживалась неизменной.

Фотографирование дуги производилось через специальный объектив на врачающийся барабан. При этом через щелевую диафрагму фиксировался только короткий участок ствола дуги (длиной около 1 мм), расположенный непосредственно на срезе конфузора соплообразного контакта.

Опыты проводились при одностороннем и двустороннем дутье с контактами, имеющими цилиндрические и конические сопла различных размеров и конфигураций. Некоторые из них показаны на рис. 4.

Типичные осциллограммы и фотографии, полученные при опытах, представлены на рис. 5 и 6.

На основании полученных опытных данных можно сделать некоторые общие выводы.

Процесс горения дуги переменного тока в дугогасителе с продольным воздушным дутьем может иметь различный характер в зависимости от степени затормаживания потока на входе в дутьевое сопло, характеризуемой величиной расчетной скорости  $w_{1\min}$ .

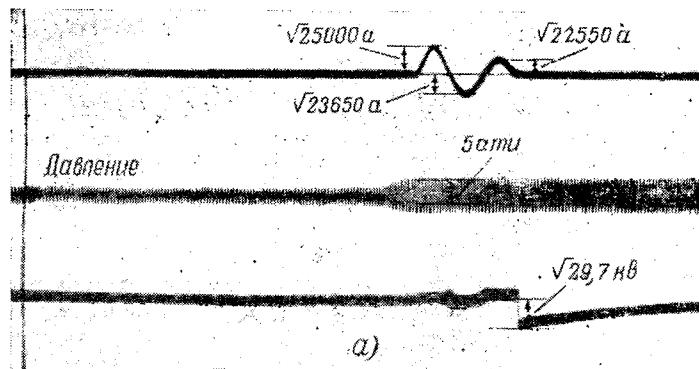


Рис. 5. Осциллограмма (а) и фотография (б) процесса гашения дуги при давлении воздуха  $p_0=5$  ати.

При значительном затормаживании потока (малые значения  $w_{1\min}$ ) ствол дуги не стабилизируется потоком, а совершает у входа в сопло поперечное движение по окружности.

В этом случае, как видно из фотографий, раскаленные ионизированные газы занимают широкую область в межконтактном промежутке, в результате чего даже при оптимальной величине промежутка и относительно небольших амплитуде и частоте переменной составляющей восстановливающегося напряжения вероятность невозобновления дуги в конце рассматриваемого полупериода очень мала.

При умеренном затормаживании потока, т. е. несколько больших значениях расчетной скорости  $w_{1\min}$  в течение всего (или большей части) полупериода ствол дуги находится в стабилизированном состоянии, располагаясь вдоль оси сопла. Этим создаются более благоприятные условия для спада дуги в конце полупериода, т. е. условия невозобновления даже при относительно больших значениях амплитуды и частоте восстановливающегося напряжения (при прочих равных условиях).

Таким образом установлено, что стабилизация ствола дуги, которая может быть достигнута при некоторой минимальной скорости потока  $w_1$  на входе, в процессе гашения дуги играет весьма важную роль.

При опытах было отмечено, что осевая стабилизация ствола дуги при прочих условиях во многом обусловлена также и геометрической формой потока в межконтактной области, т. е. формой контактов, расстоянием между ними, формой сопел и направляющих устройств.

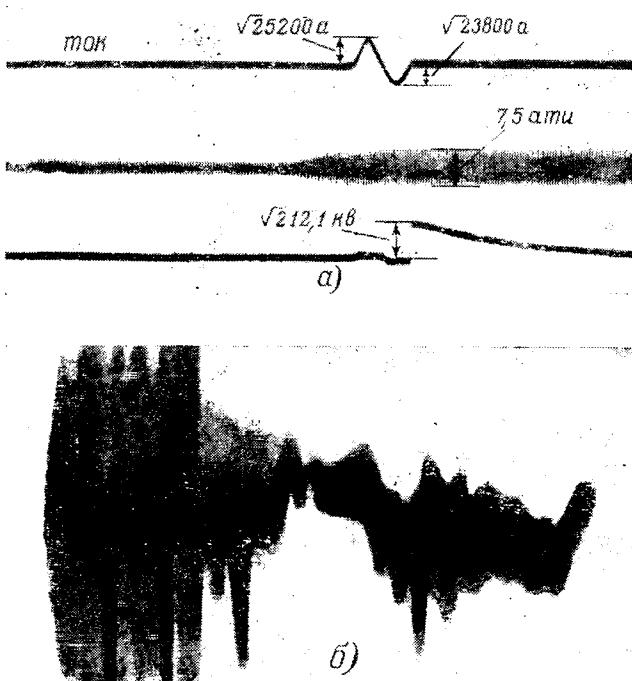


Рис. 6. Осциллограмма (а) и фотография (б) процесса гашения дуги при давлении воздуха  $p_0=7,5 \text{ атм}$ .

Например, при несоответственно большом относительном расстоянии между контактами резко ухудшаются условия стабилизации, соответственно снижается дугогасящая способность.

Установлено также, что система одностороннего дутья (рис. 4, а) при правильно выбранных геометрических параметрах является одной из наиболее эффективных и равноценна, например, системе двустороннего дутья, состоящей из двух соплообразных контактов, которая требует удвоенного расхода сжатого воздуха.

Опыты показали, что при наличии углубленного конического конфузора (рис. 4, а и б) создаются

более благоприятные условия для стабилизации ствола дуги.

В результате обобщения полученных опытных данных и анализа работы существующих конструкций дугогасителей данного типа установлена ориентировочная расчетная величина предельной наименьшей скорости  $w_{\min}$  на входе сопла при оптимальной величине промежутка между контактами (вопрос о выборе оптимального расстояния здесь упускается).

Значение этой скорости, определяемой по уравнению (17), лежит в пределах

$$w_{\min} = 5 - 10 \text{ м/сек},$$

причем меньшая величина относится к более выгодной форме потока на входе.

#### Литература

1. Petersen W., Hochspannungsforchung und Hochspannungspraxis, Berlin, Julius Springer, 1931.
2. Kesselring F. и Koppelman F., Das Schaltproblem der Hochspannungstechnik, Arch. f. El. H. 2, 1936.
3. Labouret L., Le phénomène du relouement de l'arc électrique pourvoi de coupure des interrupteurs pneumatiques, CIGRE, 1946, № 12 (Rep. 128).
4. Линниченко Н. Н., Термодинамический эффект электрической дуги, «Электричество», 1948, № 6.
5. Цейров Е. М., Влияние электрической дуги на поток воздуха в гасильной камере воздушного выключателя, «Электричество», 1949, № 11.
6. Кукеков Г. А., Проектирование выключателей переменного тока высокого напряжения, ч. I, Изд. ЛПИ, 1951.
7. Кукеков Г. А., Проектирование выключателей переменного тока высокого напряжения, Госэнергоиздат, 1961.
8. Кукеков Г. А., Разработка теории газодинамических процессов в воздушных выключателях, Отчет НИР ЛПИ им. М. И. Калинина, 1958.
9. Абрамович Г. Н., О тепловом кризисе в газовом течении, Доклад АН СССР, 1946, № 7, т. 54.
10. Вулис Л. А., Термодинамика газовых потоков, Госэнергоиздат, 1950.
11. Абрамович Г. Н., Прикладная газовая динамика, ГИТТЛ, 1954.

[14.3.1963]



УДК 621.315.21

## Нагревание и охлаждение кабеля, проложенного в земле

*С. Д. ХОЛОДНЫЙ*

Московский энергетический институт

Основной причиной нагрева силового кабеля в эксплуатации является тепло, выделяющееся в токопроводящих жилах кабеля под влиянием проходящего по ним электрического тока, и диэлектрические потери в изоляции при высоком напряжении. Дополнительное выделение тепла происходит также в металлических оболочках кабеля. Наибольшую температуру при нагреве имеют слои изоляции, непосредственно прилегающие к жиле, поэтому необходимо прежде всего определить температуру жилы.

Если в установленвшемся режиме тепловой расчет кабеля осуществляется сравнительно просто, то расчет процессов нагревания и охлаждения кабелей требует применения довольно сложного математического аппарата. Тем не менее в настоящее время существуют точные формулы для расчета нагрева кабеля, полученные с применением цилиндрических функций, для случая, когда на поверхности кабеля имеет место конвективная теплопередача тепла к окружающей среде [Л. 1].

При прокладке кабеля в земле переходный про-

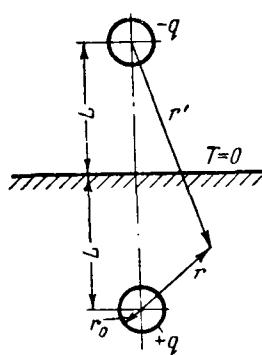


Рис. 1. Схема прокладки кабеля и расположение зеркального источника.

теплоемкость кабеля в этом случае будет играть несущественную роль.

В настоящее время существуют приближенные методы расчета нагрева кабеля, проложенного в земле, при длительных перегрузках, основанные на разделении кабеля и земли на ряд кольцевых зон и замене распределенной теплоемкости этих зон соответствующими сосредоточенными значениями [Л. 3 и 4]. Между тем можно получить расчетные формулы непосредственно интегрированием уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах, не прибегая к приближенному разделению земли на кольцевые зоны.

При небольших, но длительных перегрузках разность температуры жилы и наружной поверхности кабеля быстро достигает почти установившегося значения. При этом температура жилы может быть приближенно подсчитана по формуле:

$$\theta_{jk} = \theta_0 + T_1 + qS_k, \quad (1)$$

где  $\theta_0$  — температура на поверхности грунта;

$T_1$  — превышение температуры на поверхности кабеля над температурой поверхности земли;

$S_k$  — тепловое сопротивление кабеля в установленвшемся режиме;

$q$  — поток тепла через единицу длины, возникающий за счет потерь в кабеле.

Тепловое сопротивление различных типов кабеля может быть вычислено по формулам, приведенным в [Л. 1 и 5].

Основная трудность заключается в вычислении зависимости температуры наружной поверхности кабеля от времени. Если цилиндрический кабель с внешним радиусом  $r_0$  расположен в земле на глубине  $L$  и выделяет в грунт тепловую энергию на единицу длины, равную  $q$ , то к такой задаче можно применить метод зеркальных отображений, обычно применяемый для вычисления теплового сопротивления грунта в установленвшемся режиме [Л. 1] (рис. 1). Тепловое поле в грунте не изменится, если считать, что последний распространен во все стороны на бесконечное расстояние, но существует еще отрицательный источник тепла  $-q$ , расположенный в верхней половине грунта на расстоянии  $L$  от поверхности. Этот метод может быть применен также для неустановившегося режима, так как в этом случае на поверхности грунта превышение температуры над температурой поверхности

грунта в начальный момент, вызванное обоими источниками, останется равным нулю в любой момент времени, т. е. граничные условия не изменятся.

Для превышения температуры в любой точке грунта над температурой поверхности земли, возникающего за счет одного из источников, например  $+q$ , можно записать известное уравнение теплопроводности [Л. 1], которое в цилиндрических координатах выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$  — коэффициент температуропроводности грунта;

$\lambda$  — теплопроводность,  $c$  — теплоемкость,  $\gamma$  — плотность грунта;

$t$  — время.

При решении этого уравнения необходимо знать начальные и граничные условия.

Произведем сначала расчет при условии, что выделение тепла в кабеле не зависит от времени, и в момент времени, равный нулю, превышение в любой точке грунта над температурой поверхности грунта равно нулю. Это позволяет применять операторный метод решения уравнения (2).

Очевидно, что в бесконечно удаленной точке превышение температуры должно быть ограниченным для любого момента времени. Теперь остается установить еще условия на границе между поверхностью излучателя и грунтом. Принципиально можно получить решение с учетом теплоемкости самого кабеля, но в этом случае окончательная формула для вычислений получается весьма сложной, что исключает ее практическое применение. С другой стороны, если время, прошедшее после включения кабеля под нагрузку, таково, что успела прогреться значительная масса грунта, то теплоемкость кабеля по сравнению с теплоемкостью грунта будет играть весьма несущественную роль. Поэтому далее решение будет проведено для случая, когда выделение тепла происходит на тонкой оси. Критерий применимости такого решения для реальных кабелей будет приведен ниже.

Предположим, что источник тепла представляет собой тонкостенную трубку радиусом  $r_0$ . Тогда для границы  $r=r_0$  можно записать уравнение теплового баланса

$$-2\pi\lambda r_0 \frac{\partial T}{\partial r} = q, \quad (3)$$

т. е. испускаемое тепло отводится за счет теплопроводности грунта на границе  $r=r_0$ .

Применяя к уравнениям (2) и (3) преобразование Карсона — Хевисайда [Л. 6 и 7], получим в области изображений

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} = \frac{p}{a} \bar{T}, \quad (4)$$

$$-2\pi\lambda r_0 \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} = q, \quad (5)$$

где  $p$  — комплексное число.

Решение уравнения (4) имеет вид [Л. 6 и 8]:

$$\bar{T} = MI_0\left(r\sqrt{\frac{p}{a}}\right) + NK_0\left(r\sqrt{\frac{p}{a}}\right), \quad (6)$$

где  $M$  и  $N$  — произвольные постоянные;

$I_0$  — цилиндрическая функция мнимого аргумента первого рода нулевого порядка;  $K_0$  — функция Макдональда нулевого порядка.

При увеличении  $r$  функция  $I_0$  монотонно возрастает, поэтому для сохранения условия ограниченности в бесконечности коэффициент  $M$  следует принять равным нулю. Тогда решение примет вид:

$$\bar{T} = NK_0\left(r\sqrt{\frac{p}{a}}\right). \quad (7)$$

Подставив решение (7) в уравнение (5) и учитывая соотношение  $K'_0(z) = -K_1(z)$ , получим:

$$2\pi\lambda r_0 \sqrt{\frac{p}{a}} NK_1\left(r_0\sqrt{\frac{p}{a}}\right) = q, \quad (8)$$

где  $K_1$  — функция Макдональда первого порядка.

Если аргумент  $z$  функции Макдональда весьма мал, то имеют место соотношения:

$$K_1(z) \approx \frac{1}{z}; \quad K_0(z) \approx -\ln \frac{z}{2} + C, \quad (9)$$

где  $C = 0,5772$  — постоянная Эйлера.

Если устремить  $r_0$  к нулю, то из уравнения (8) с учетом соотношения (9) можно найти  $N$ :

$$N = \frac{q}{2\pi\lambda}. \quad (10)$$

В этом случае выделение тепла будет происходить с весьма тонкой оси, а решение (7) при учете одного источника тепла примет вид:

$$\bar{T} = \frac{q}{2\pi\lambda} K_0\left(r\sqrt{\frac{p}{a}}\right). \quad (11)$$

Однако, кроме реального источника тепла, необходимо учитывать и зеркальный источник (рис. 1). При учете двух источников получим:

$$\bar{T} = \frac{q}{2\pi\lambda} \left[ K_0\left(r\sqrt{\frac{p}{a}}\right) - K_0\left(r'\sqrt{\frac{p}{a}}\right) \right], \quad (12)$$

где  $r$  — расстояние от искомой точки в грунте до реального источника тепла;

$r'$  — то же до зеркального источника.

Для нахождения оригинала функции по ее изображению необходимо применить формулу обращения [Л. 7]:

$$T = \frac{1}{2\pi i} \int_{r-i\infty}^{r+i\infty} \frac{\bar{T} e^{pt}}{p} dp, \quad (13)$$

где  $i = \sqrt{-1}$ ;

$\gamma$  — положительное действительное число.

Из рис. 2 видно, что интегрирование должно производиться по прямой  $D_1D$ . Это равнозначно тому, что интегрирование производится по контуру  $D_1A_1B_1AD$ , так как внутри этого контура нет особых точек. Однако по лемме Жордана [Л. 7] следует, что интеграл на дугах  $AD$  и  $A_1D_1$  равен нулю, если  $R$  стремится к бесконечности. Таким образом,

интеграл (13) можно заменить интегралом по контуру  $A_1BA$ , а если  $R$  стремится к бесконечности, и этот контур бесконечно близко стягивается к действительной оси, то интегралом по контуру  $(-\infty, 0, -\infty)$ .

Кроме того, при обходе контуrom начала координат, где подынтегральная функция в формуле (13) имеет особенность, появится дополнительное слагаемое, равное  $\bar{T}(0)$ . Тогда с учетом отношения (9) оригинал изображения (12) будет вычисляться следующим образом:

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda} \left[ \ln \frac{r'}{r} + \frac{1}{2\pi i} \left( \int_{-\infty}^0 \frac{K_0\left(r\sqrt{\frac{p}{a}}\right) - K_0\left(r'\sqrt{\frac{p}{a}}\right)}{p} e^{pt} dp + \int_0^\infty \frac{K_0\left(r\sqrt{\frac{p}{a}}\right) - K_0\left(r'\sqrt{\frac{p}{a}}\right)}{p} e^{pt} dp \right) \right], \quad (14)$$

причем в первом интеграле интегрирование ведется по нижней стороне действительной оси, где аргумент  $p$  равен  $-\pi$ , а во втором — по верхней стороне, где аргумент  $p$  равен  $+\pi$ .

Заменим пределы интегрирования на положительные и поменяем знак  $p$  в подынтегральной функции в уравнении (14) и заменим функции Макдональда известными соотношениями [Л. 7 и 8]:

$$K_0(z) = \frac{\pi i}{2} [J_0(iz) + iY_0(iz)]; \quad Y_0(-z) = Y_0(z) + 2iI_0(z). \quad (15)$$

Тогда после алгебраических преобразований получим:

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda} \left[ \ln l - \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{J_0\left(r\sqrt{\frac{p}{a}}\right) - J_0\left(r'\sqrt{\frac{p}{a}}\right)}{p} e^{pt} dp \right], \quad (16)$$

где  $l = \frac{r'}{r}$ ;

$J_0$  и  $Y$  — цилиндрические функции первого и второго рода нулевого порядка.

Введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} r\sqrt{\frac{p}{a}} &= ix; \\ p &= -\frac{a}{r^2}x^2. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

После подстановки  $x$  вместо  $p$  получим:

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda} \left[ \ln l - \int_0^\infty \frac{J_0(x) - J_0(lx)}{x} e^{-\frac{a}{r^2}x^2 t} dx \right]. \quad (18)$$

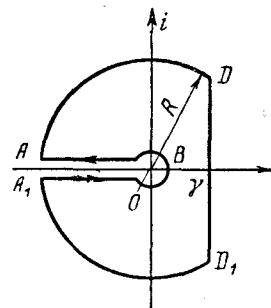


Рис. 2. Вычисление интеграла формулы обращения.

При бесконечно большом времени интеграл в формуле (18) будет равен нулю и наступит установившийся режим, при этом

$$T_0 = \frac{q}{2\pi\lambda} \ln l. \quad (19)$$

Это выражение совпадает с известной формулой для вычисления температуры в грунте, приведенной в [Л. 1 и 5].

Для вычисления интеграла в формуле (18) следует использовать разложение функции  $J_0$  по степеням [Л. 6 и 8], тогда получим для переходного процесса:

$$\begin{aligned} T_{\text{пер}} &= -\frac{q}{2\pi\lambda} \int_0^\infty \frac{J_0(x) - J_0(lx)}{x} e^{-\frac{a}{r^2} x^2 t} dx = \\ &= \frac{q}{2\pi\lambda} \int_0^\infty d\left(\frac{x}{2}\right) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(m!)^2} \left(\frac{x}{2}\right)^{2m-1} e^{-\frac{4at}{r^2} \left(\frac{x}{2}\right)^2} - \\ &- \frac{q}{2\pi\lambda} \int_0^\infty d\left(\frac{xl}{2}\right) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(m!)^2} \left(\frac{lx}{2}\right)^{2m-1} e^{-\frac{4at}{l^2 r^2} \left(\frac{xl}{2}\right)^2}, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $m$  принимает значения 1, 2, 3... $\infty$ .

Каждый член ряда (20) может быть проинтегрирован, так как известно соотношение [Л. 6]:

$$\int_0^\infty \zeta^{2m-1} e^{-A\zeta^2} = \frac{(m-1)!}{2A^m}, \quad (21)$$

где  $m$  может принимать значения  $m=1, 2, 3\dots\infty$ .

Тогда уравнение (20) записывается в виде:

$$\begin{aligned} T_{\text{пер}} &= -\frac{q}{2\pi\lambda} \left[ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m (m-1)!}{(m!)^2 2A_1^m} - \right. \\ &\quad \left. - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m (m-1)!}{(m!)^2 2A_2^m} \right], \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$A_1 = \frac{4at}{r^2}; \quad A_2 = \frac{4at}{l^2 r^2}.$$

При малых значениях  $A_1$  и  $A_2$  вычисление рядов (22) весьма затруднительно, поэтому преобразуем их к интегральной форме.

Введем обозначение:

$$y_1 = \frac{1}{A_1} \quad \text{и} \quad y_2 = \frac{1}{A_2}. \quad (23)$$

Можно показать, что имеет место следующее равенство:

$$\int_0^y \frac{e^{-y}-1}{y} dy = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m (m-1)!}{(m!)^2} y^m. \quad (24)$$

В этом легко убедиться, если продифференцировать обе части равенства по  $y$  и заменить  $e^{-y}$  соответствующим разложением в ряд [Л. 6]. При этом уравнение (22) можно записать в виде:

$$T_{\text{пер}} = -\frac{q}{2\pi\lambda} \left[ \frac{1}{2} \int_0^{y_1} \frac{e^{-y_1}-1}{y_1} dy_1 - \frac{1}{2} \int_0^{y_2} \frac{e^{-y_2}-1}{y_2} dy_2 \right]. \quad (25)$$

Окончательно температуру в любой точке грунта можно вычислить по формуле

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda} G(t), \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned} G(t) &= \ln l + \frac{1}{2} \int_0^{y_1} \frac{1-e^{-y_1}}{y_1} dy_1 - \frac{1}{2} \int_0^{y_2} \frac{1-e^{-y_2}}{y_2} dy_2; \\ y_1 &= \frac{r^2}{4at}; \\ y_2 &= l^2 y_1. \end{aligned}$$

Значения интегралов в уравнении (26) можно вычислять приближенными методами или непосредственно находить по кривой, приведенной на рис. 3. При  $y > 4$  справедливо соотношение:

$$\int_0^y \frac{1-e^{-y}}{y} dy \approx C + \ln y, \quad (27)$$

где  $C = 0,5772$  (постоянная Эйлера).

При  $y < 0,1$  интеграл можно вычислять по приближенной формуле, которая следует из соотношения (24):

$$\int_0^y \frac{1-e^{-y}}{y} dy \approx y - \frac{y^2}{4}. \quad (28)$$

Формула (26) справедлива, если выделение тепла не зависит от времени и происходит в бесконечно тонкой оси. Для реального кабеля величина постоянной  $N$  не будет соответствовать уравнению (10), и конечная формула получается весьма сложной. Однако контрольные расчеты показали, что результаты получаются весьма близкими к значениям температуры, полученным по формуле (26). Расхождения будут тем меньше, чем большее время

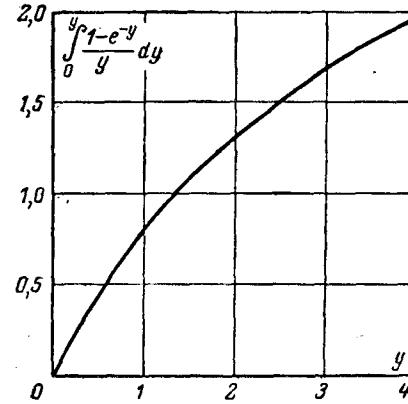


Рис. 3. Зависимость интеграла

$$\int_0^y \frac{1-e^{-y}}{y} dy$$

протекло с начала процесса нагрева, и при  $y_1 \leq 0,25$  формула (26) является достаточно точной. В то же время она удобна для вычислений.

**Пример.** Кабель с наружным радиусом  $r_0 = 25 \text{ мм}$  проложен в земле на глубине  $L = 700 \text{ мм}$ . Найдем температуру на наружной поверхности кабеля через 1 ч после включения его под нагрузку, если потери в кабеле соответствуют  $q = 0,5 \text{ вт/см}$ . По справочнику [Л. 9] находим, что для грунта  $\gamma = 1800 \text{ кг/м}^3$ ,  $c = 0,20 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$ . Тепловое сопротивление грунта обычно принимается  $\sigma = 120 \text{ вт/см} \cdot \text{град}$  [Л. 1], что соответствует  $\lambda = 0,72 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$ ; отсюда  $a = \frac{\lambda}{\gamma c} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{ч}$ .

Для наружной поверхности кабеля  $r = r_0$ , а  $r' \approx 2L$ . Тогда  $y_1 = \frac{r_0^2}{4at} = 0,0781$  (безразмерная величина);  $y_2 = y_1 l^2 = 245,0$ , так как  $l = l_0 = \frac{r'}{r} = \frac{2L}{r_0} = 56$ .

Находим интеграл, содержащий  $y_1$ , по формуле (28), а интеграл, содержащий  $y_2$  — по формуле (27):

$$\int_0^{y_1} \frac{1 - e^{-y_1}}{y_1} dy_1 = y_1 - \frac{y_1^2}{4} = 0,0766;$$

$$\int_0^{y_2} \frac{1 - e^{-y_2}}{y_2} dy_2 = C + \ln y_2 = 6,075,$$

$\ln l_0 = \ln 56 = 4,01$ . При этом  $G(t)$  составит 1,01. Таким образом, окончательно по формуле (26) получим:  $T = \frac{q}{2\pi\lambda} \cdot 1,01$ . Подставляя значения  $q$  и  $\lambda$ , получим:

$$T = \frac{0,5}{2\pi} \cdot 120 \cdot 1,01 = 9,63^\circ \text{ С.}$$

Если необходимо найти температуру в любой точке грунта, то достаточно подставить соответствующие величины  $r$  и  $r'$  в выражения для  $y_1$  и  $y_2$ . Эта температура определяется для вычисления нагрева кабелей, проложенных поблизости от кабеля, который находится под нагрузкой.

Описанным способом можно определить всю кривую нагрева поверхности кабеля и любой точки грунта в зависимости от времени для заданных условий прокладки. Однако тепловые параметры грунта весьма сильно влияют на результаты вычислений, поэтому при расчетах необходимо в максимальной степени учитывать особенности грунта, в котором будет проложен кабель. Кроме того, сама зависимость (26) может быть использована для экспериментального определения тепловых параметров грунта.

На рис. 4 приведены кривые, рассчитанные по уравнению (26). Эти результаты достаточно точно совпадают с экспериментальными кривыми, приведенными в [Л. 10] для конкретного случая  $l_0 = 20$  (они приведены также в [Л. 5], стр. 310).

На основе кривых на рис. 4 или непосредственно по формуле (26) можно вычислить зависимость функции  $G(t)$  от параметра  $\frac{at}{r^2}$  для любого конкретного значения  $l$  (т. е. для определенных условий прокладки). Примеры таких кривых приведены на рис. 5.

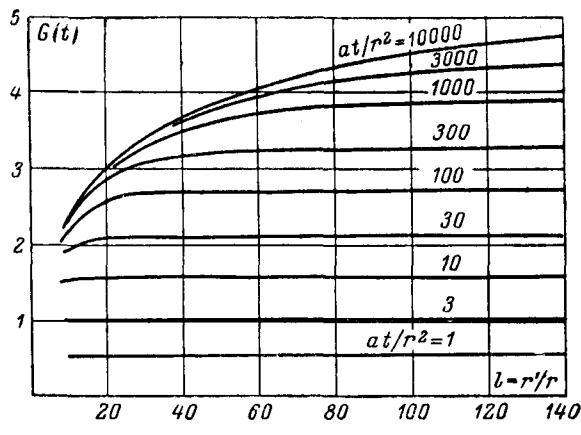


Рис. 4. Зависимость функции  $G(t)$  от параметра  $\frac{at}{r^2}$  и соотношения  $l = \frac{r'}{r}$ .

Используя кривые на рис. 5, можно показать, что неустановившийся режим кабеля, проложенного в земле, длится весьма продолжительное время. Так, для рассмотренного ранее примера при  $r_0 = 25 \text{ мм}$  и  $l_0 = 56$  превышение температуры поверхности кабеля составит 0,9 от установленного режима лишь после 245 ч после начала нагрева, что следует из кривых на рис. 4, по которым можно определить  $G(245 \text{ ч}) = 3,6$ . Это составляет 0,9 от  $G(\infty) = \ln 56 = 4,01$ .

Полученные уравнения справедливы только при нулевых начальных условиях и потерях в кабеле, не зависящих от времени.

Температуру для произвольного режима нагрева можно вычислять, используя интеграл Дюа-Меля [Л. 6]:

$$T = \frac{1}{2\pi\lambda} \left[ q(0)G(t) + \int_0^t q'(\tau)G(t-\tau)d\tau \right], \quad (29)$$

где  $\tau$  — переменная интегрирования по времени;  $q(0)$  — потери в кабеле в начальный момент включения.

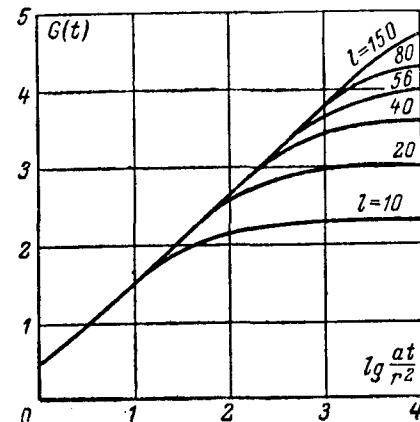


Рис. 5. Зависимость функции  $G(t)$  от логарифма параметра  $\frac{at}{r^2}$ .

При этом предполагается, что в начальный момент при включении кабеля его температура была равна температуре поверхности грунта. Вычисления можно производить методом приближенного интегрирования, но при этом необходимо знать полный график потерь в кабеле в зависимости от времени.

Если изменение нагрузки и потерь происходит ступенями на величину  $\Delta q_n$  при  $t_n$ , то уравнение (29) можно записать в виде:

$$T = \frac{1}{2\pi\lambda} [q(0)G(t) + \Delta q_1 G(t - t_1) + \Delta q_2 G(t - t_2) + \dots]. \quad (30)$$

**Пример.** Предположим, что в приведенном ранее примере кабель находился под постоянной нагрузкой, так что  $q(0) = 0,5 \text{ вт/см}$ , в течение 244 ч. Далее нагрузка уменьшилась, так что  $q$  стало равным 0,3 вт/см. Вычислим, каково будет превышение температуры поверхности кабеля через 1 ч после изменения нагрузки, т. е. через 245 ч после начала нагрева кабеля.

Как было показано ранее, через 245 ч переходная функция достигнет величины  $G(245) = 0,9 \ln l_0$ , при  $\ln l_0 = 4,01$ . Для заданного изменения нагрузки  $\Delta q_1 = -0,2 \text{ вт/см}$ . Величина  $G(t - t_1)$  равна  $G(245 - 244) = G(1) = 1,01$ , как это было показано при вычислениях, приведенных ранее. Тогда по формуле (30) получим:

$$T = \frac{120}{2\pi} [0,5 \text{ вт/см} \cdot 0,9 \cdot 4,01 - 0,2 \text{ вт/см} \cdot 1,01] = \\ = 34,4 - 3,8 = 30,6^\circ \text{ С.}$$

**Заключение.** Расчеты показали, что кабель, проложенный в земле, нагревается гораздо медленнее, чем при других видах прокладки. Это происходит

вследствие того, что в данном случае прогревается весь объем грунта, тепловая инерция которого многократно превосходит тепловую инерцию кабеля. Во многих случаях даже через 10 суток тепловой режим кабеля оказывается еще далеким от установившегося. Это может иметь большое значение при расчете допустимых токов в кабеле при переменном режиме нагрузки и расчете подпитывающих систем маслонаполненных кабелей. Полученные уравнения позволяют вычислить нагрев и охлаждение кабелей со значительно большей точностью, чем существующие приближенные методы расчета.

### Литература

1. Брагин С. М., Тепловой расчет электрических кабелей, ОНТИ, 1937.
2. Гринберг Г. А. и Сонц М. Т., ЖТФ, вып. 1—2, 1941, т. XI.
3. Бронгулеева М. Н. и Городецкий С. С., Кабельные линии высокого напряжения, Госэнергоиздат, 1963.
4. Shanklin G. B. и Buller F. H., Cyclical loading of buried cable a pipe cable, Trans. AIEE, 1953, v. 72, part III, p. 535—541.
5. Брагин С. М., Электрический и тепловой расчет кабеля, Госэнергоиздат, 1960.
6. Бронштейн И. И. и Семенцов К. А., Справочник по математике, Физматгиз, 1962.
7. Диткин В. А. и Кузнецов П. И., Справочник по операционному исчислению, Гостехиздат, 1951.
8. Ватсон Г. Н., Теория Бесселевых функций, ч. 1, Изд. иностранной литературы, 1949.
9. Чиркин В. С., Теплофизические свойства материалов, Физматгиз, 1959.
10. Neher J. H., El. Eng., May 1949, p. 412.

[17.1.1964]



УДК 621.316.933.6

## Электрическая прочность искрового промежутка с вращающейся дугой магнитно-вентильных разрядников

Инж. А. И. БРОНФМАН

Завод «Пролетарий»

Искровые промежутки с вращающейся дугой являются основным элементом магнитно-вентильных разрядников, применяемых в аппаратах на напряжения до 500 кв [Л. 1].

Схематическое изображение такого искрового промежутка представлено на рис. 1. Два медных электрода 1 и 2 располагаются в одной плоскости, образуя кольцевой зазор. По обе стороны от электродов помещаются изолирующие прокладки 3 из дугостойкого материала. Перпендикулярно плоскости искрового промежутка при помощи постоянных магнитов 4 создается магнитное поле, поэтому после пробоя искрового промежутка дуга приходит в движение и перемещается по кольцевому зазору,

пока происходит ее горение. При этом интенсивно охлаждается дуговой канал и предотвращается оплавление электродов. Благодаря этому дугогасящая способность промежутка с вращающейся дугой существенно повышается по сравнению со случаем неподвижно горящей дуги.

Как показали экспериментальные исследования [Л. 2], искровые промежутки с вращающейся дугой характеризуются высокой дугогасящей способностью при нагрузочных токах длительностью 0,01 сек с амплитудой вплоть до 5 ка. Однако до последнего времени не были в достаточной степени вскрыты причины их высокой дугогасящей способности.

На основании экспериментальных исследований и аналитических расчетов и исходя из практики работы искровых промежутков дается анализ восстановливающейся прочности искровых промежутков с вращающейся дугой в широком диапазоне времени от момента погасания дуги до полного восстановления электрической прочности промежутка.

Результаты работы рекомендуется учесть при конструировании аппаратов на напряжение 750 кв, а также при разработке схем защиты с применением магнитно-вентильных разрядников на все классы напряжения.

Во время горения дуги в кольцевом зазоре искрового промежутка дуга перемещается по зазору со скоростью, доходящей до нескольких сот метров в секунду [Л. 3]. При этом за один полупериод частоты 50 гц дуга многократно обегает кольцевой зазор (до 18 раз при рабочем диаметре электрода<sup>1</sup> 40 мм, амплитуде тока 3 кА и магнитном поле  $6 \cdot 10^4$  а/см). Поэтому энергия, выделяющаяся в дуге, практически равномерно распределяется по всей длине кольцевого зазора. Часть этой энергии (50—60% по опытным данным) поступает в электроды и расходуется на их нагревание. Выполненные расчеты показывают, что за время протекания тока (0,01 сек) успевает заметно нагреться лишь слой металла толщиной 1—2 мм, непосредственно прилегающий к рабочей поверхности электродов. При этом средняя температура рабочей поверхности электродов достигает 150—200° С. Остальная часть электродов остается практически холодной.

По опытным данным, в момент погасания дуги температура воздуха в кольцевом зазоре ниже температуры свечения газа и только небольшая область зазора (где горела дуга в момент ее погасания) заполнена распадающейся плазмой дуги. С момента погасания дуги происходит интенсивная деионизация области, занятой плазмой, и продолжается процесс охлаждения воздуха во всем кольцевом зазоре. Деионизации и охлаждению воздуха в сильной мере способствуют близость металлических поверхностей электродов (зазор, в котором горит дуга, составляет около 1 мм) и движение воздуха в зазоре во время горения дуги и после ее погасания, носящее, по-видимому, турбулентный характер.

Остаточная ионизация воздуха в кольцевом зазоре, термическая диссоциация части молекул воздуха, наличие примесей в зазоре (паров металла электродов и продуктов распада изолирующих прокладок), наконец, температура и давление воздуха — все эти факторы влияют на восстанавливющуюся прочность искрового промежутка после погасания в нем электрической дуги.

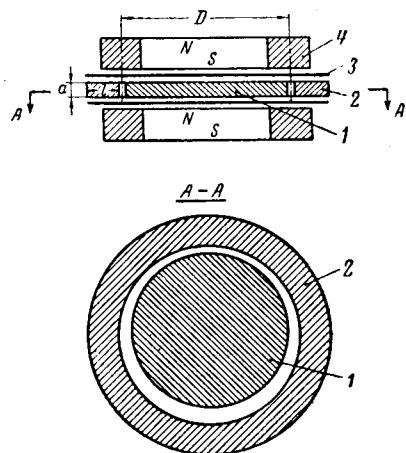
Изменение во времени относительной восстанавливющейся прочности<sup>2</sup> промежутка может быть

<sup>1</sup> Под рабочим диаметром электрода понимается диаметр кольцевой поверхности электрода, образующей кольцевой зазор.

<sup>2</sup> Под относительной восстанавливющейся прочностью понимается отношение среднего значения восстанавливющейся прочности промежутка к его пробивному напряжению.

Рис. 1. Схематическое изображение искрового промежутка с вращающейся дугой.

1 — электрод внутренний;  
2 — электрод наружный;  
3 — изолирующая прокладка;  
4 — постоянный магнит.



схематически представлено графиком, изображенным на рис. 2. Кривая восстанавливющейся прочности состоит из ряда участков: AB, BC, CD и DE, каждому из которых соответствует свой закон изменения восстанавливющейся прочности промежутка.

В начальный период после погасания дуги (участок кривой AB), когда температура остаточной плазмы достаточно высока, восстанавливющаяся прочность промежутка определяется перечисленными факторами, причем существенным является влияние остаточной ионизации и диссоциации молекул воздуха. Скорость восстановления прочности в начальный период оценивается следующим образом. Допустим, что деионизация происходит только за счет рекомбинации заряженных частиц у поверхности электродов, а охлаждение воздуха — только за счет его теплопроводности. Известно, что дифференциальное уравнение диффузии, характеризующее поверхностную рекомбинацию ионов, и уравнение теплопроводности, определяющее температуру, имеют одинаковое математическое выражение. У обоих процессов одна и та же постоянная времени  $\tau_1$ , которая при расстоянии между электродами  $d$  приближенно равна:

$$\tau_1 = \frac{d^2 \rho c_p}{\pi^2 \lambda}, \quad (1)$$

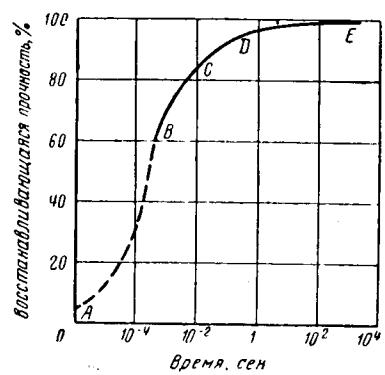
где  $\rho$  — плотность воздуха;

$c_p$  — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности воздуха.

Постоянная времени  $\tau_1$  растет с уменьшением температуры. При  $d=0,7-1,0$  мм и характерных

Рис. 2. Восстанавливющаяся прочность искрового промежутка с вращающейся дугой в зависимости от времени.



для воздуха при  $1000^{\circ}\text{C}$  значениях  $\rho = 0,275 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $c_p = 1,0 \cdot 10^3 \text{ дж}/\text{кг} \cdot \text{град}$  и  $\lambda = 7,6 \cdot 10^{-2} \text{ вт}/\text{м} \cdot \text{град}$  будет  $\tau_1 = 0,1 - 0,3 \text{ мсек}$ . При больших температурах  $\tau_1$  еще меньше.

Таким образом, длительность первого периода восстановления прочности искрового промежутка не превышает одной миллисекунды. За это время прочность промежутка повышается от первоначального значения в несколько сот вольт до 40—60% пробивного напряжения промежутка.

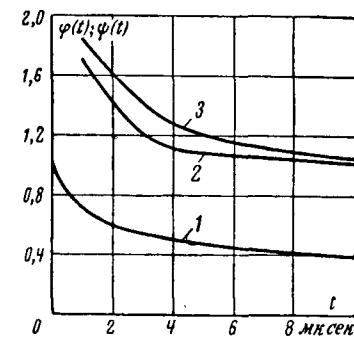


Рис. 3. Функции  $\varphi(t)$  и  $\psi(t)$ .  
1 —  $\varphi(t)$ ; 2 —  $\psi(t)$  при  $d=0,7 \text{ мм}$   
( $U_{\text{пр}}=3,5 \text{ кв}$ ); 3 —  $\psi(t)$  при  $d=0,85 \text{ мм}$  ( $U_{\text{пр}}=4 \text{ кв}$ ).

металла и продуктов распада изолирующих прокладок, давление и др.), по опытным данным, дают поправку к величине прочности, не превышающую примерно 5%.

Решение дифференциального уравнения теплопроводности для этого отрезка времени приводит к следующему приближенному выражению для восстанавливющейся прочности промежутка  $U(t)$ :

$$U(t) = \frac{100 \cdot U_0}{1 + \frac{1}{T_0} \cdot \frac{2q_a \sqrt{t_0}}{\sqrt{\pi \rho_1 c_1 \lambda_1}} \varphi(t) \psi(t)} \%, \quad (2)$$

где  $q_a$  — средняя мощность дуги, поступающая в единицу рабочей поверхности электрода;  $t_0$  — время горения дуги;

$\rho_1$  — плотность материала электрода;

$c_1$  — удельная теплоемкость материала электрода;

$\lambda_1$  — коэффициент теплопроводности материала электродов.

При этом приняты следующие основные допущения:

а) переменная во времени мощность дуги заменена ее средним значением;

б) энергия дуги, вращающейся по кольцевому зазору, принята равномерно распределенной по кольцу.

Выражение  $\frac{2q_a \sqrt{t_0}}{\sqrt{\pi \rho_1 c_1 \lambda_1}}$  определяет усредненную температуру рабочих поверхностей электролов в момент погасания дуги.

Множитель

$$\varphi(t) = \frac{1}{\beta t} \left[ 1 + 2 \sum_{v=1}^{\infty} \frac{e^{-\frac{\lambda_1 \pi^2 v^2}{c_1 \rho_1 l^2} t}}{1 + \left( \frac{\pi v}{\beta t} \right)^2} \right] \quad (3)$$

характеризует изменение во времени температуры рабочей поверхности электрода вследствие выравнивания температуры по его сечению.

В последнем выражении коэффициент  $\beta$  определяет начальное распределение температуры по сечению электрода в момент погасания дуги ( $\beta = 11,5$  при  $t_0 = 0,01 \text{ сек}$  и определяется из выражения  $T_x = T_0 e^{-\beta x}$ );  $l$  — ширина электрода (рис. 1).

Множитель

$$\psi(t) = 1 + T_s e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (4)$$

характеризует превышение температуры воздуха над температурой рабочей поверхности электролов.

При температуре  $100^{\circ}\text{C}$  ( $c_p = 10^3 \text{ дж}/\text{кг} \cdot \text{град}$ ,  $\rho = 0,95 \text{ кг}/\text{м}^3$  и  $\lambda = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ вт}/\text{м} \cdot \text{град}$ ) из (1) находим, что  $\tau_1 = 1 - 3 \text{ мсек}$ .

Коэффициент  $U_0$  представляет собой прочность промежутка с тем же составом газа при начальной температуре  $T_0$  (этим коэффициентом учитываются поправки к прочности, не зависящие от температуры).

Коэффициент  $T_s$  характеризует начальное превышение температуры воздуха над температурой электролов.

Величины  $U_0$  и  $T_s$ , мало отличающиеся от единицы, устанавливаются эмпирически. Хорошее совпадение с опытными данными дают значения  $U_0 = 0,95$  и  $T_s = 1,2$ .

При числовых значениях коэффициентов, характерных для искрового промежутка с медными электродами ( $c_1 = 418 \text{ дж}/\text{кг} \cdot \text{град}$ ,  $\rho_1 = 8,75 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$  и  $\lambda_1 = 400 \text{ вт}/\text{м} \cdot \text{град}$ ), имеющего пробивное напряжение 3,5 кв и подвергнутого воздействию нагрузочного тока длительностью 0,01 сек:

$$U(t) = \frac{95}{1 + \frac{22i_m}{aD} \cdot \varphi(t) \psi(t)} \quad (5)$$

где  $i_m$  — амплитуда тока,  $ка$ ;  
 $a$  и  $D$  — соответственно толщина и средний рабочий диаметр электролов,  $мм$ .

Графики функций  $\varphi(t)$  и  $\psi(t)$  представлены на рис. 3.

При  $t = 10 \text{ мсек}$  будет  $\psi(t) \approx 1$ ,  $\varphi(t)$  превышает значение  $\varphi(t) \Big|_{t=\infty} = \frac{1}{\beta t}$  примерно в 4—5 раз.

Участок  $BC$ , для которого справедливы формулы (2) и (5), длится во времени от 1 до примерно 10 мсек. К концу этого периода прочность промежутка достигает 80—90%.

При больших временах ( $t \gg \tau_1$ ) на участке кривой  $CD$  температура воздуха в кольцевом зазоре практически равна температуре рабочей поверхности электролов ( $\psi(t) = 1$ ). Кроме того, незначительным становится влияние на восстанавливющуюся прочность промежутка других факторов, помимо температуры электролов (постоянная времени которых также близка к  $\tau_1$ ). Поэтому на участке кривой  $CD$  восстанавливющаяся прочность промежутка определяется только законом

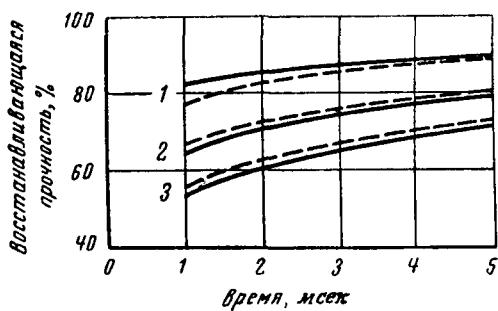


Рис. 4. Сравнительные кривые восстанавливающейся прочности искрового промежутка с электродами диаметром 40–42 мм и толщиной 4 мм. Пробивное напряжение 3,5 кв. Амплитуда тока: 1—1 ка; 2—3 ка; 3—5 ка.

Сплошные кривые — расчетные; пунктирные — экспериментальные.

выравнивания температуры по сечению электрода, т. е.

$$U(t) = \frac{100}{1 + \frac{1}{T_0} \cdot \frac{2q_0 \sqrt{t_0}}{\sqrt{\pi \cdot \rho_1 c_1 \lambda_1}} \varphi(t)} \quad (6)$$

или в случае медных электродов после протекания нагрузочного тока длительностью 0,01 сек:

$$U(t) = \frac{100}{1 + \frac{22i_m}{aD} \varphi(t)} \quad (7)$$

При достаточно больших временах:

$$\varphi(t) = \frac{1}{\beta t} \left[ 1 + 2 \frac{e^{-\frac{\pi^2 \lambda_1}{c_1 \rho_1 t^2} \cdot t}}{1 + \left( \frac{\pi}{\beta t} \right)^2} \right]. \quad (8)$$

При этом постоянная времени роста прочности  $\tau_2$  на участке кривой  $CD$  составит:

$$\tau_2 = \frac{l^2 \rho_1 c_1}{\pi^2 \lambda_1}. \quad (9)$$

Для медных электродов при  $l=10$  мм получается  $\tau_2 \approx 0,1$  сек.

Таким образом, участок кривой  $CD$  продолжается до нескольких десятых долей секунды. К концу этого участка выравнивается температура по всему сечению электрода. При этом усредненная температура электродов составляет величину порядка  $10^\circ\text{C}$  ( $12^\circ\text{C}$  — при рабочем диаметре электродов 40 мм, толщине электродов 4 мм и амплитуде тока 3 ка). Поэтому к концу указанного отрезка времени относительная прочность промежутка составит 96—98%.

Для практических целей такая восстанавливающаяся прочность равнозначна пробивному напряжению промежутка.

Полное восстановление прочности промежутка достигается уже на последнем участке кривой  $DE$  после окончательного остывания электродов до температуры окружающей среды.

Для открытого искрового промежутка постоянная времени отдачи тепла  $\tau_3$  составляет:

$$\tau_3 = \frac{Gc_1}{S \cdot K_t}, \quad (10)$$

где  $G$  — вес электрода;

$K_t$  — коэффициент теплопередачи электрода;

$S$  — поверхность отдачи тепла.

Для медных электродов при обычных для искрового промежутка габаритах ( $G=0,06$  кг,  $S=0,4 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup> и  $K_t=10$  вт/м<sup>2</sup>·град)  $\tau_3$  близко к 10 мин.

Таким образом, полное восстановление прочности искрового промежутка с вращающейся дугой происходит через 20—30 мин после протекания нагрузочного тока.

Сравнение расчетных значений восстанавливающейся прочности с экспериментальными в наиболее важном для работы разрядников диапазоне времени 1—5 мсек выполнено на рис. 4. Из рисунка видно, что при токах от 1 до 5 ка расхождения составляют 1—2% при временах 3—5 мсек и не превышают 5% при времени 1 мсек.

**Выводы.** 1. Кривая восстанавливающейся прочности искрового промежутка с вращающейся дугой может быть разбита на отдельные отрезки, каждый из которых характеризуется своим законом нарастания электрической прочности.

2. В начальный период после погасания дуги прочность промежутка определяется температурой воздуха в кольцевом зазоре, степенью его ионизации и диссоциации, наличием примесей в воздухе и другими факторами. Этот период длится менее одной миллисекунды, и к его концу относительная восстанавливающаяся прочность промежутка достигает 40—60%.

3. При временах 1—10 мсек восстанавливающаяся прочность промежутка определяется в основном температурой воздуха в кольцевом зазоре и примерно на 5% другими факторами, не связанными с температурой. К концу этого участка прочность промежутка повышается до 80% и более.

4. При временах порядка 0,1 сек восстанавливающаяся прочность промежутка практически определяется только температурой рабочей поверхности электродов. Через несколько десятых долей секунды после протекания нагрузочного тока прочность промежутка практически достигает его пробивного напряжения (с точностью 3—4%).

5. Полное восстановление электрической прочности промежутка достигается к моменту окончательного остывания электродов через 20—30 мин после протекания нагрузочного тока.

#### Литература

1. Савельев В. П., Шматович В. В., Пружинина В. И. и Пугачев В. К., Комбинированный магнитно-вентильный разрядник на напряжение 500 кв, «Электричество», 1961, № 4.

2. Бронфман А. И., К вопросу о восстанавливающейся прочности искровых промежутков с вращающейся дугой, «Электротехника», 1964, № 2.

3. Бронфман А. И., Движение электрической дуги в кольцевых зазорах искровых промежутков магнитно-вентильных разрядников, «Электричество», 1963, № 8.

[18.7.1963]



# Зависимость электрической прочности длинных воздушных промежутков от частоты колебательного напряжения

Кандидат техн. наук Г. Н. АЛЕКСАНДРОВ и инж. В. Л. ИВАНОВ

Ленинградский политехнический институт

Диапазон частот внутренних перенапряжений, действующих на изоляцию линий электропередачи и подстанционного оборудования, чрезвычайно широк: от нескольких десятков герц для длинных линий до тысяч герц для подстанционного оборудования (при отключении трансформаторов и реакторов). Обоснованный выбор изоляции линий и подстанций поэтому возможен лишь при известных зависимостях электрической прочности воздушных промежутков и гирлянд изоляторов от частоты действующего напряжения. В последнее время эти зависимости привлекли внимание многих авторов [Л. 1—5]. Однако отсутствие единой методики испытаний и обработки результатов наблюдений (различие формы испытательных напряжений, резкое различие количества измерений, определяющего точность измеряемых разрядных напряжений и характеристику их разброса, введение поправок на метеорологические условия, различие условий экспериментирования — в залах и на нагрузочных стендах) существенно затрудняет возможность сопоставления и обобщения опубликованных данных.

В [Л. 1] изоляция подвергалась воздействию апериодических импульсов напряжения с длиной фронта 100 и 1 000 мксек (длина импульсов 3 200 и 4 000 мксек соответственно). Заметного изменения электрической прочности воздушных промежутков при изменении крутизны импульсов в таких широких пределах (в 10 раз) не обнаружено. Указано, что среднеквадратичные отклонения разрядных напряжений от средних значений составляют 2÷4 %. Опыты проводились в зале. Некоторые результаты испытаний несколько необычны: электрическая прочность сухих гирлянд изоляторов при отрицательной полярности импульса оказалась ниже, чем при положительной.

В [Л. 2] выявлена сильная зависимость разрядных напряжений воздушного промежутка типа стержень — плоскость длиной до 6 м от крутизны фронта действующего косоугольного импульса напряжения в пределах изменения предразрядного времени от 20 до 700 мксек. При этом обнаружен минимум разрядных напряжений при предразрядных временах 100—200 мксек. Сравнение полученных минимальных разрядных напряжений с разрядными напряжениями при плавном подъеме напряжения промышленной частоты по данным [Л. 6] приводит авторов к выводу о существенном снижении разрядных напряжений при внутренних перенапряжениях (до 30%). Следует заметить, однако, что данные [Л. 6] завышены примерно на 10% в результате введения поправок на метеоусловия [Л. 7]. Поэтому в действительности снижение электрической прочности воздушных промежутков при воздействии высокочастотных колебаний напряжения значительно меньше [Л. 8]. Этот вывод под-

тверждается данными [Л. 3], где сопоставлены результаты измерений разрядных напряжений различных воздушных промежутков длиной до 5 м (стержень — стержень, стержень — плоскость, провод — провод, провод — плоскость) при воздействии импульсов с длиной фронта 120 и 600 мксек (с амплитудой до 1 100 кв) и при плавном подъеме напряжения промышленной частоты, произведенных в одинаковых условиях.

По данным [Л. 3] 50%-ные разрядные напряжения при воздействии импульсов с фронтом 600 мксек и при плавном подъеме напряжения промышленной частоты практически совпадают. При воздействии импульсов с фронтом 120 мксек 50%-ные разрядные напряжения промежутков провод — провод, стержень — провод, стержень — стержень ниже на 10% и промежутков стержень — плоскость, провод — плоскость — на 20%. К сожалению, в [Л. 2 и 3] не приводятся данные о разбросе разрядных напряжений, которые необходимы для выбора изоляции (см. ниже и [Л. 9]).

В [Л. 4] в соответствии с данными [Л. 3] не выявлена зависимость разрядных напряжений промежутка стержень — плоскость длиной 1 м и их разброса ( $\sigma=3\text{--}4\%$ ) от частоты действующего колебательного напряжения в пределах от 150 до 450 гц (длина фронта импульса 1 700—550 мксек). Установлено также, что разрядные напряжения и их разброс, измеренные при наложении колебательного импульса на напряжение промышленной частоты, длительно приложенное к разрядному промежутку (отношение амплитуд импульса и напряжения промышленной частоты 2:1), и при отсутствии предварительно приложенного напряжения практически совпадают.

При испытаниях более длинных воздушных промежутков (до 7 м) и гирлянд изоляторов при частоте колебательного напряжения 55 гц (длина фронта  $t_{\Phi}=4\,500$  мксек) наружном испытательном стенде был обнаружен чрезвычайно большой разброс разрядных напряжений (стандарт  $\sigma=6\text{--}8\%$  от величины 50%-ного разрядного напряжения). Разряд всегда происходит на фронте воздействующего напряжения. Вблизи максимума напряжения разряд не происходит даже при амплитуде воздействующего напряжения, значительно меньшей, чем 50%-ное разрядное напряжение (напряжения, при котором 50% воздействий приводят к разряду). Это обстоятельство определило выявленное в работе существенное различие 50%-ных и средних разрядных напряжений промежутков. Последние определялись как среднее значение фактических разрядных напряжений по осцилограммам при воздействии напряжения, обеспечивающего 100%-ную вероятность разряда.

В [Л. 5] обнаружены зависимости от частоты колебательного напряжения всех параметров стати-

стических распределений разрядных напряжений воздушных промежутков длиной до 6 м ( $50\%$ -ного и среднего разрядного напряжения  $U_{50\%}$  и  $\bar{U}_p$ , стандарта зависимости вероятности разряда  $\sigma$  и дисперсии разрядных напряжений  $\sigma_p^2$ ) при изменении частоты от 30 до 180 гц (длина фронта импульса  $9000 \div 1350$  мкsec). Все эти параметры имеют тенденцию к уменьшению при увеличении частоты колебаний напряжения. В этой же работе указана возможная причина такой зависимости: различие в расположении накапливаемого объемного заряда ионов. При низких частотах область распространения объемного заряда, создаваемого коронным разрядом, велика (порядка метра и более), что приводит к выравниванию поля разрядного промежутка, к ограничению напряженности поля вблизи коронирующего электрода. При больших частотах объемный заряд, перемещаясь в узкой области вблизи электродов, напротив, способствует развитию разряда.

Недостатком большинства перечисленных работ является отсутствие проверки повторяемости результатов испытаний при случайных колебаниях параметров атмосферного воздуха, небольшая точность оценки разброса разрядных напряжений или отсутствие такой оценки. Поэтому естественно было попытаться изучить закономерности развития разряда при воздействии внутренних перенапряжений путем сопоставления большого числа измерений для исключения влияния случайных колебаний метеоусловий [Л. 7] и увеличения точности определения разбросов разрядных напряжений.

Измерения разрядных напряжений воздушных промежутков и гирлянд изоляторов производились на наружном испытательном стенде ЛПИ [Л. 7 и 9]. В качестве источника колебательного затухающего

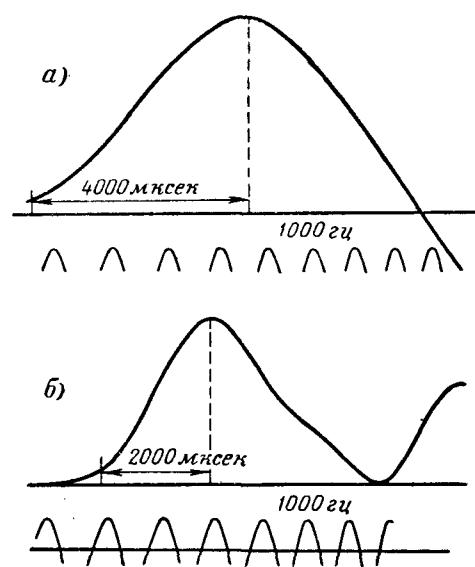


Рис. 2. Характерные осциллограммы испытательного напряжения.

напряжения использовался каскад трансформаторов  $3 \times 750$  кв, питаемый от колебательного контура (рис. 1). При испытаниях выявилась необходимость согласования собственных частот колебательных контуров, образуемых каждой ступенью каскада. Лишь при близких собственных частотах указанных контуров удавалось получить достаточно высокое напряжение на выходе каскада. Схемы согласованных контуров каскада ЛПИ, использующие дополнительную обмотку 6 кв, находящуюся под потенциалом высоковольтного вывода повышающего трансформатора ТIII, приведены на рис. 1.

На рис. 2 приведены характерные осциллограммы испытательного напряжения. Диапазон изменения длительности фронта импульса напряжения при первом его всплеске был ограничен, с одной стороны, собственными частотами колебательных контуров ступеней каскада и, с другой стороны, параметрами питающего колебательного контура и составлял  $2000 \div 5000$  мкsec. Такой диапазон изменения длины фронта испытательного импульса соответствует возможным крутизнам внутренних перенапряжений на линиях сверхвысокого напряжения. Длительность фронта импульса определялась как время нарастания напряжения от  $0,1 U_m$  до амплитудного значения  $U_m$ .

В каждой серии опытов при заданном промежутке и заданной форме воздействующего напряжения (длине фронта) определялись параметры двух статистических распределений: зависимости вероятности перекрытия испытываемого промежутка от амплитуды воздействующего напряжения и распределения фактических разрядных напряжений, определяемых по осциллограммам. Одновременно регистрировались метеорологические условия. Однако в соответствии с данными, приведенными в [Л. 7 и 9], поправки на отклонение метеоусловий от нормальных не вводились.

При измерениях амплитуда воздействующего напряжения изменялась ступенями через 3—5%.

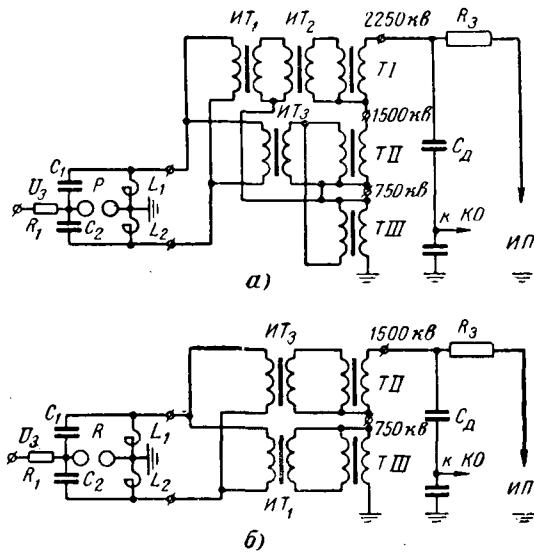


Рис. 1. Схема испытательной установки при использовании каскада трансформаторов  $3 \times 750$  кв.

*a*—при использовании трех трансформаторов; *б*—при использовании двух трансформаторов;  $T_1$ ,  $T_{II}$  и  $T_{III}$ —повышающие трансформаторы 6/750 кв;  $IT_1$ ,  $IT_2$  и  $IT_3$ —изолирующие трансформаторы 6/6 кв;  $C_1$  и  $C_2$ —батарея конденсаторов;  $L_1$  и  $L_2$ —реакторы колебательного контура.

В схемах *а* и *б* у трансформатора  $T_{III}$  использовалась обмотка 6 кв под потенциалом 750 кв.

При каждой ступени производилось не менее 10 воздействий, в результате которых определялась ориентировочно зависимость вероятности перекрытия от амплитуды воздействующего напряжения. Для более точного определения стандарта зависимости вероятности перекрытия производились дополнительные измерения при амплитудах напряжения, соответствующих вероятностям перекрытия 0,05—0,20 и 0,80—0,95 (по 35—50 воздействий). Поскольку зависимости вероятностей перекрытия воздушных промежутков при воздействии колебательного напряжения близки к нормальным [Л. 4], параметры этих зависимостей могут быть вычислены по данным испытаний при указанных двух значениях воздействующего напряжения  $U_1$  и  $U_2$  согласно соотношениям [Л. 10]:

$$U_{50\%} = \frac{U_1 \cdot t(\psi(U_2)) - U_2 \cdot t(\psi(U_1))}{t(\psi(U_2)) - t(\psi(U_1))}, \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{U_2 - U_1}{t(\psi(U_2)) - t(\psi(U_1))}, \quad (2)$$

где  $\psi(U_1)$  и  $\psi(U_2)$  — вероятности перекрытия при амплитудах воздействующего напряжения  $U_1$  и  $U_2$ ;

$t(\psi)$  — обратная функция нормального распределения  $(\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times \int_{-\infty}^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx)$ , а связь между  $U$  и  $t$  определяется соотношением  $t = \frac{U - U_{50\%}}{\sigma}$ .

При таком способе оценки параметров зависимости необходимое суммарное число воздействий напряжения при двух значениях вероятности  $\psi$  для определения величин  $U_{50\%}$  и  $\sigma$  с заданной точностью и надежностью близко к минимальному и может быть вычислено с помощью приближенных формул:

$$n_{U_{50\%}} = \frac{2z^2}{\epsilon_{U_{50\%}}} = 2 \left( \frac{U_{50\%}}{\sigma_{U_{50\%}}} \right)^2 \left( \frac{\sigma}{U_{50\%}} \right)^2; \quad n_{\sigma} = \frac{2\sigma^2}{\epsilon_{\sigma}}. \quad (3)$$

Задаваясь точностью  $\epsilon_{U_{50\%}} = \frac{z\sigma_{U_{50\%}}}{U_{50\%}}$  и  $\epsilon_{\sigma} = \frac{z\sigma_{\sigma}}{\sigma}$  и надежностью 0,95 ( $z = 1,96$  по таблицам интеграла вероятностей), получим:

$$n_{U_{50\%}} = 2 \left( \frac{1,96}{\epsilon_{U_{50\%}}} \right)^2 \left( \frac{\sigma}{U_{50\%}} \right)^2; \quad n_{\sigma} = 2 \left( \frac{1,96}{\epsilon_{\sigma}} \right)^2. \quad (4)$$

При величинах вероятностей  $\psi(U_1)$  и  $\psi(U_2)$ , выходящих за указанные выше пределы, формулы для вычисления  $n_{U_{50\%}}$  и  $n_{\sigma}$  усложняются, а число измерений, необходимое для определения параметров зависимости  $\psi(U)$  с заданной точностью, увеличивается [Л. 10].

Необходимое суммарное число воздействий напряжения при двух значениях вероятности  $\psi$  при

различной требуемой точности и двух значениях отношения  $\frac{\sigma}{U_{50\%}} = 0,1$  и 0,05 приведено в таблице.

#### Необходимое число испытаний для определения параметров зависимости вероятности перекрытия и распределения разрядных напряжений

$\frac{\sigma}{U_{50\%}}$	$n_{U_{50\%}}$		$n_{\bar{U}_p}$		$\frac{n_{\sigma}}{n_{\sigma_p}}$	$n_{\sigma}$	$n_{\sigma_p}$
	0,10	0,05	0,10	0,05			
0,005	3 080	768	1 540	384	0,10	768	192
0,010	768	192	384	96	0,20	192	48
0,02	192	48	96	24	0,30	86	22
0,040	48	12	24	6	0,40	48	12
0,050	32	8	16	4	0,50	32	8

Для определения параметров распределения фактических разрядных напряжений требуется значительно меньшее число испытаний. Действительно, общее число испытаний, необходимое для определения параметров распределения случайной величины, каковой является разрядное напряжение  $U_p$ ,  $\sigma_p$  и  $\bar{U}_p$ , определяется согласно теории вероятностей следующими формулами:

$$n_{\bar{U}_p} = \frac{\sigma_p^2}{\sigma_{\bar{U}_p}^2}; \quad n_{\sigma_p} = \frac{\sigma_p^2}{2\sigma_{\sigma_p}^2}. \quad (5)$$

Из формул (3) и (5) следует, что необходимое число испытаний для определения  $\bar{U}_p$  с заданной степенью точности вдвое меньше, чем для определения  $U_{50\%}$ . Необходимое число испытаний для определения  $\sigma_p$  с заданной точностью вчетверо меньше, чем для  $\sigma$ . Соответствующие данные также приведены в таблице.

Из этой таблицы следует, что для получения параметров статистических распределений с приемлемой точностью необходимо произвести большое число повторных испытаний. В частности, число испытаний, требуемое для определения  $\sigma$  с точностью до 10%, настолько велико (768), что их невозможно произвести при неизменных метеорологических условиях на открытой установке. По-видимому, наиболее правильный путь определения  $\sigma$  с приемлемой точностью — это накопление статистических данных в течение длительного периода при ограниченном числе испытаний в течение одного дня, например при числе испытаний от 50 до 100.

На рис. 3 приведены полученные в результате многократных испытаний зависимости вероятности перекрытия воздушного промежутка стержень — плоскость длиной 3 м от амплитуды воздействующего напряжения при длительности фронта 2 000 и 4 500 мксек. Каждая точка, нанесенная на графике, является результатом 25—50 испытаний при неизменной амплитуде напряжения. Вероятность  $\psi(U)$  определялась как отношение числа перекрытий при заданной амплитуде напряжения  $U$  к общему числу воздействий напряжения такой амплитуды. На этом же рисунке нанесены гистограммы распределения разрядных напряжений для обоих случаев. Как видно из рис. 3, зависимости вероятности перекрытия промежутка при разной длительности фронта воздействующего напряже-

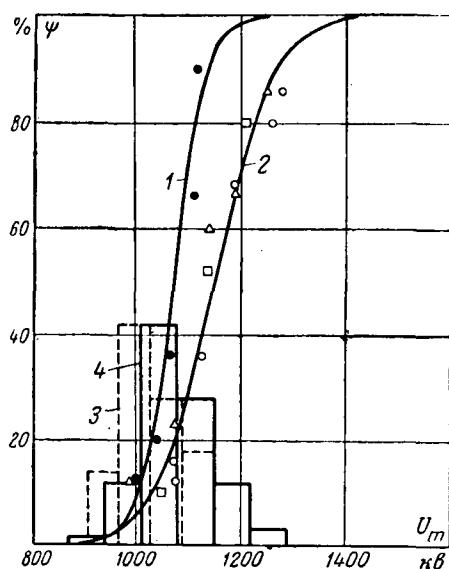


Рис. 3. Зависимости вероятности перекрытия промежутка стержень — плоскость длиной 3 м от амплитуды воздействующего напряжения.

1 — длительность фронта 2000 мксек; 2 — длительность фронта 4500 мксек; 3 — гистограмма распределения разрядных напряжений при длительности фронта 2000 мксек; 4 — то же при длительности фронта 4500 мксек.

ния различны: при меньшей длительности фронта указанная зависимость сдвинута в сторону меньших амплитуд напряжения и значительно круче.

На рис. 4 приведены параметры статистических распределений разрядных напряжений и зависимостей вероятностей перекрытия промежутков стержень — плоскость длиной 3 и 5 м, измеренные при различных длительностях фронта воздействующего напряжения положительной полярности при многократном повторении испытаний. Каждая точка для  $U_{50\%}$  и  $\sigma$  является результатом обработки 100—150 испытаний (при определении зависимости вероятности перекрытия от амплитуды воздействующего напряжения); каждая точка для  $\bar{U}_p$  и  $\sigma_p = 50 \div 75$  испытаний. Согласно данным, приведенным в табл. 1, точность определения  $U_{50\%}$  и  $\bar{U}_p$  чрезвычайно высока и соответствует точности измерения напряжения с помощью делителя напряжения и осциллографа, равной 2—3%. Поэтому разброс полученных значений  $U_{50\%}$  и  $\bar{U}_p$  может быть отнесен в основном за счет колебаний метеорологических условий [Л. 7]. Точность определения  $\sigma$ , несмотря на большое число испытаний, низка (погрешность порядка 30%). Поэтому полученный большой разброс измеренных значений  $\sigma$  должен быть отнесен полностью за счет недостаточного числа испытаний при каждой серии опытов.

В результате усреднения полученных в разные дни значений  $\sigma$  точность его определения может быть значительно повышена (в предположении, что влияние метеоусловий на величину  $\sigma$  мало). Усреднение полученных параметров  $U_{50\%}$ ,  $\bar{U}_p$ ,  $\sigma$  и  $\sigma_p$  произведено одновременно с отысканием их зависимостей от длительности фронта воздействующего напряжения по методу наименьших квадратов (в пред-

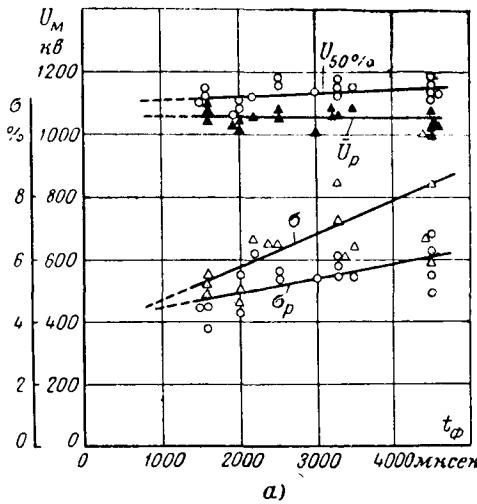


Рис. 4. Зависимости параметров распределения разрядных напряжений и зависимостей вероятности перекрытия от длительности фронта воздействующего напряжения. а — для промежутка стержень — плоскость длиной 3 м; б — для промежутка стержень — плоскость длиной 5 м;  $U_{50\%}$  — 50%-ное разрядное напряжение;  $\sigma$  — стандарт зависимости в процентах от  $U_{50\%}$ ;  $\bar{U}_p$  — среднее разрядное напряжение;  $\sigma_p$  — среднее квадратичное отклонение от среднего значения в процентах от  $\bar{U}_p$ .

положении линейности этих зависимостей в обследованном диапазоне изменения длин фронта) [Л. 11]. Эти зависимости также приведены на рис. 4. В результате такого усреднения с использованием данных для всех обследованных частот точность определения  $\sigma$  и  $\sigma_p$  существенно повысилась, а для  $U_{50\%}$  и  $\bar{U}_p$  получены данные для усредненных метеоусловий. В итоге погрешности  $\sigma$  и  $\sigma_p$  для промежутков длиной 3 и 5 м в среднем для полученных зависимостей с надежностью 0,95 не превышают 15%.

Данные, приведенные на рис. 4, позволяют сделать следующие выводы. Средние разрядные напряжения  $\bar{U}_p$  в обследованном диапазоне длин фронта воздействующего напряжения практически не изменяются. Однако при увеличении длины фронта возрастает разница между средними и 50%-ными разрядными напряжениями и соответственно между  $\sigma$  и  $\sigma_p$ , что может быть объяснено вышеупомянутыми соображениями о роли объемного заряда.

Действительно, чем меньше частота воздействующего напряжения, тем медленнее нарастает напряжение вблизи максимума, причем малая скорость нарастания напряжения имеет место при большем интервале изменения напряжения. При малой скорости нарастания напряжения относительная скорость распространения области объемного заряда оказывается настолько большой, что исключаются рост напряженности поля вблизи коронирующего электрода и возможность развития разряда. Поэтому разница между  $U_{50\%}$  и  $\bar{U}_p$  возрастает при увеличении длительности фронта. Интересно, что зависимость отношения  $\frac{\bar{U}_p}{U_{50\%}}$  от длительности фронта одинакова для промежутков разной длины (рис. 5).

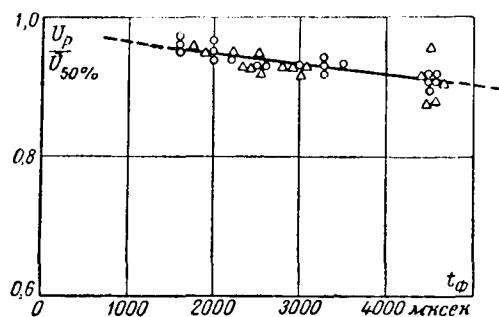


Рис. 5. Зависимость отношения  $\frac{U_p}{U_{50\%}}$  от длительности фронта воздействующего напряжения для промежутка стержень—плоскость.  
 ○ — длиной 3 м; Δ — длиной 5 м.

Таким образом, различие 50%-ных и средних разрядных напряжений свидетельствует о заметной роли движения объемного заряда при развитии разряда в длинных воздушных промежутках, связанного с воздействием пологого импульса напряжения. Напротив, отсутствие такого различия можно трактовать как свидетельство малой роли движения объемного заряда. Например, характерно, что при исследовании мокроразрядных напряжений длинных гирлянд изоляторов при воздействии импульсов колебательного напряжения различие  $U_{50\%}$  и  $U_p$  не обнаружено, практически совпадают и  $\sigma$  и  $\sigma_p$ . В этих условиях (при дожде) разряд вдоль гирлянды в отличие от воздушных промежутков происходит не только на фронте и при амплитудном значении напряжения, но и далеко за максимумом (рис. 6), что определяется длительностью

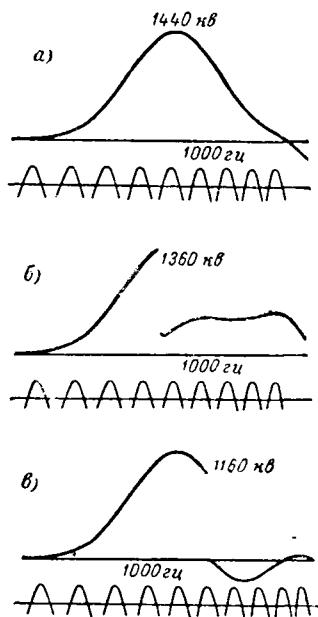


Рис. 6. Характерные осциллограммы напряжения при испытаниях гирлянды из 18 изоляторов П-II под дождем (вероятность перекрытия  $\phi = 0,86$ ).

перехода частичного перекрытия в дугу. Именно возможностью развития неполного перекрытия смоченной гирлянды до полного благодаря поверхности проводимости гирлянды [Л. 12] определяется снижение мокроразрядных напряжений длинных гирлянд изоляторов при воздействии внутренних перенапряжений. Характерно также уменьшение разброса разрядных напряжений гирлянды под дождем по сравнению с разбросом разрядных напряжений сухой гирлянды.

Выясним влияние зависимости 50%-ных разрядных напряжений от частоты воздействующего напряжения на условия работы изоляции линий сверхвысокого напряжения.

Число перекрытий в год изоляции линии, защищенной разрядником, при воздействии внутренних перенапряжений, закон распределения которых определяется интегральной функцией  $\Phi_n(U)$ , может быть вычислено по приближенной формуле [Л. 9]:

$$N_r = n_n \Phi_n(U_{\text{раз}}) \frac{m}{V^{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{U_{\text{раз}} - U_{50\%}}{\sigma_{\text{раз}} + \sigma^2}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (6)$$

где  $n_n$  — число перенапряжений в год произвольной величины;

$U_{\text{раз}}$  — среднее пробивное напряжение (уставка) разрядника;

$m$  — расчетное число ослабленных мест, которое согласно [Л. 13] может быть принято равным 500;

$\sigma_{\text{раз}}^2$  — дисперсия пробивных напряжений разрядника;

$U_{50\%}$  — 50%-ное разрядное напряжение одного ослабленного места (например, воздушных промежутков на опоре);

$\sigma$  — стандарт зависимости вероятности его перекрытия.

Интеграл в формуле (6) представляет собой табулированную функцию нормального распределения.

Полагая, например, что  $U_{50\%}(4000 \text{ мксек}) = \frac{U_{\text{раз}}}{0,7}$  [Л. 13],  $\sigma_{\text{раз}} = 0,04U_{\text{раз}}$  и согласно рис. 4, б  $\sigma = 0,08U_{50\%} = 0,114U_{\text{раз}}$ , получим, что в этом случае  $N_r = 0,1n_n \Phi_n(U_{\text{раз}})$ .

При  $t_{\phi} = 1000 \text{ мксек}$   $U_{50\%}(1000 \text{ мксек}) = 0,955U_{50\%}(4000 \text{ мксек}) = 1,36U_{\text{раз}}$ ;  $\sigma = 0,05U_{50\%} = 0,068U_{\text{раз}}$ . При этих данных  $N_r = 0,008n_n \Phi_n(U_{\text{раз}})$ , т. е. несмотря на заметное снижение 50%-ного разрядного напряжения при повышении частоты с 62,5 гц ( $t_{\phi} = 4000 \text{ мксек}$ ) до 250 гц ( $t_{\phi} = 1000 \text{ мксек}$ ) число перекрытий изоляции линии при воздействии внутренних перенапряжений снижается в 12,5 раза. Таким образом, снижение 50%-ных разрядных напряжений изоляции еще не дает оснований для заключения о снижении ее электрической прочности, которая может повыситься при соответствующем уменьшении  $\sigma$  (разумеется, если электрическую прочность характеризовать вероятным числом перекрытий).

Произведенные выше расчеты показывают, что наиболее опасными перенапряжениями являются перенапряжения с наиболее низкими частотами, при которых вероятность перекрытия изоляции линий выше. Это утверждение справедливо для обследованного диапазона частот. Заключение об условиях работы изоляции линий и подстанционного оборудования при более высоких частотах может быть сделано после тщательного изучения разброса разрядных напряжений в этих условиях.

#### Литература

1. Rohlfss, Fiegel, Anderson, The flashover strength of extrahigh voltage line and station insulation, Power App. and Syst. 1961, № 55.

# Исследование цифровых автоматических систем методом логарифмических характеристик

Кандидат техн. наук, доц. Б. К. ЧЕМОДАНОВ и инж. Г. И. ФЕКЛИСОВ

Москва

Динамика цифровых автоматических систем (ЦАС) отличается рядом особенностей, поскольку преобразование сигнала характеризуется как квантованием его по времени, так и по уровню. Поэтому динамика ЦАС описывается сложными системами нелинейных разностных уравнений, для которых не существует общих методов решения. Даже при применении приближенных методов встречаются значительные трудности [Л. 1—4].

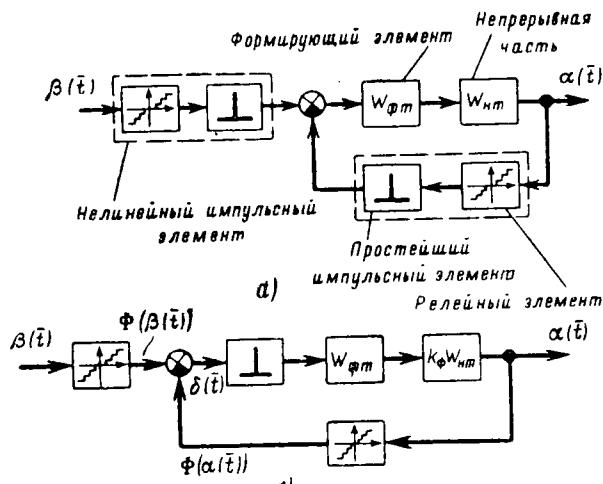


Рис. 1.

В [Л. 5] для анализа и синтеза импульсных автоматических систем (ИАС), характеризующихся квантованием сигнала только по времени, был применен метод логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ) на основе использования  $\omega$ -преобразования, определяемого соотношением

$$q = L_n \frac{1 - \frac{T}{2} \omega}{1 + \frac{T}{2} \omega} \quad (1)$$

или

$$\omega = \frac{2}{T} \arctg \frac{\omega^* T}{2}, \quad (1a)$$

где  $\omega (q = j\omega T)$  — частота;  
 $\omega^* (\omega = j\omega^*)$  — псевдочастота;  
 $T$  — период дискретности.

В данной статье изложены методы исследования ЦАС с помощью логарифмических характеристик, основанные на использовании результатов в области анализа и синтеза ЦАС, полученных в [Л. 5].

Структурная схема ЦАС может быть приведена к виду, представленному на рис. 1. Последовательное соединение идеального многоступенчатого релейного элемента и идеального импульсного элемента будем называть в дальнейшем нелинейным импульсным элементом (НИЭ) [Л. 2].

Аналог метода гармонического баланса в ЦАС. Наличие в схеме ЦАС нелинейного импульсного элемента в ряде случаев приводит к возникновению периодического режима с периодом  $T_N$ , кратным периоду  $T$  повторения импульсов, т. е.  $T_N = NT$ , и с относительной частотой

$$\bar{\omega}_N = \omega_N T = \frac{2\pi}{N}.$$

Анализ периодических режимов, возникающих в ЦАС при отсутствии внешних воздействий, приводит к рассмотрению системы нелинейных уравнений, связывающих комплексные амплитуды на входе и выходе НИЭ. Для практических приложений

2. Стекольников И. С. и Базелян Э. М., Снижение разрядных напряжений изоляции электросистем при некотором виде коммутационных перенапряжений, «Электричество», 1962, № 7.

3. Takesita Hideyo, Miyake Joshihagi, Oikawa Toshio, Kamata Juzuru, Flashover characteristics of large spacings in air, Hittachi Rev., 1962, № 5.

4. Александров Г. Н. и Иванов В. Л., Исследование электрической прочности воздушных промежутков и гирлянд изоляторов при воздействии внутренних перенапряжений, «Электричество», 1962, № 9.

5. Гутман Ю. М., Степина Н. И. и Филиппов А. А., Разрядные напряжения воздушной и линейной изоляции при коммутационных волнах простейшей формы, Изв. НИИПТ, 1962, № 9.

6. Тихоедев Н. Н. и Тушнов А. Н., Разрядные напряжения воздушных промежутков при переменном напряжении, «Электричество», 1958, № 3.

7. Александров Г. Н., Кизеветтер В. Е., Рудакова М. и Тушнова А. Н., Разрядные напряжения длинных воздушных промежутков и гирлянд изоляторов при переменном напряжении, «Электричество», 1962, № 5.

8. Александров Г. Н. и Половой И. Ф., О снижении разрядных напряжений при коммутационных перенапряжениях, «Электричество», 1963, № 7.

9. Александров Г. Н., Некоторые исследования электрической прочности изоляции линий сверхвысокого напряжения, Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и транспорт, 1963, № 2.

10. Егудин Г. И., Каплан В. В. и Нашатырь В. М., Методика статистических исследований процессов, при которых случайная величина не может быть непосредственно измерена, Труды совещания по статистике, Киев, 1963.

11. Пирятин В. Д., Обработка результатов экспериментальных измерений по способу наименьших квадратов, Харьков, 1962.

12. Александров Г. Н. и Кизеветтер В. Е., Развитие разряда вдоль проводящей поверхности изоляции в электрических сетях, Изв. вузов, Энергетика, 1962, № 5.

13. Александров Г. Н., Методика выбора изоляции линий электропередачи по условию надежной работы при воздействии внутренних перенапряжений, Изв. вузов, Энергетика, 1962, № 7.



более важно не нахождение точного решения указанной системы, а отыскание приближенных методов, позволяющих простым способом найти режимы в ЦАС, близкие к точным периодическим режимам.

Простота и эффективность метода гармонического баланса в непрерывных нелинейных системах делает целесообразной попытку распространить этот метод на цифровые системы. Такая попытка впервые сделана М. М. Симкиным [Л. 1].

Обозначим комплексные амплитуды основных гармонических решетчатых функций на входе и выходе НИЭ соответственно через  $F = ae^{j\varphi}$ ,  $G = be^{j\theta}$ . При применении аналога метода гармонического баланса будем считать, что истинная решетчатая периодическая функция на выходе НИЭ близка к основной гармонической решетчатой функции [Л. 2]:

$$a[n] = a \cos(\bar{\omega}_N n + \varphi). \quad (2)$$

Обозначим теперь передаточную функцию разомкнутой импульсной системы, соответствующей ЦАС без учета квантования по уровню, через

$$W^*(q, \varepsilon) = \bar{D} \left\{ \frac{k_\Phi}{T} W_{\Phi t}(p) W_{nt}(p) \right\},$$

где  $W_{nt}(p)$  — передаточная функция непрерывной части ЦАС;

$\varepsilon$  — относительное смещение.

Система нелинейных уравнений периодического режима в рассматриваемом случае заменяется одним уравнением

$$ae^{j\varphi} = -W^*(j\bar{\omega}_N, 0)be^{j\theta}. \quad (3)$$

Введем комплексный коэффициент усиления НИЭ по основной гармонике

$$J(a, \varphi, N) = \frac{b}{a} e^{j(\pi + \theta - \varphi)}. \quad (4)$$

Зависимость комплексного коэффициента усиления НИЭ от переменных  $a$ ,  $\varphi$  и  $N$  характеризуется следующими выражениями:

$$\begin{aligned} b &= \sqrt{C^2 + D^2}, \\ \theta &= \operatorname{arctg} \left( -\frac{D}{C} \right), \\ C &= \frac{2}{N} \sum_{v=1}^N \Phi[a \cos(\bar{\omega}_N v + \varphi)] \cos \bar{\omega}_N v, \\ D &= \frac{2}{N} \sum_{v=1}^N \Phi[a \cos(\bar{\omega}_N v + \varphi)] \sin \bar{\omega}_N v. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом (4) уравнение (3) может быть записано в виде:

$$J_{(a, \varphi, N)} = W^{*-1}(j\bar{\omega}_N, 0). \quad (6)$$

Построение графика функции  $J(a, \varphi, N)$  затруднено, поскольку она, как следует из (5), представляет собой разрывную функцию аргументов  $a$ ,  $\varphi$  и  $N$ .

Для определения периодических режимов в ЦАС параметры  $a$ ,  $\varphi$  и  $N$  следует рассматривать в пределах:

а)  $0 \leq a < \infty$  при неограниченном числе  $s$ ,  $0 \leq a \leq a_{\max}$  при ограниченном числе  $s$ ; б)  $-\frac{\bar{\omega}_N}{2} \leq \varphi \leq \frac{\bar{\omega}_N}{2}$ ; в)  $N \geq 2$ , причем  $N$  — целое число.

Построение графика функции

$$J(a, \varphi, N) = \operatorname{Re} J + j \operatorname{Im} J$$

облегчается, если воспользоваться свойствами симметрии этого графика. Справедливо следующее свойство 1: для любого фиксированного  $N$  и переменных значений  $a$  и  $\varphi$  график функции  $J(a, \varphi, N)$  при любом  $a \geq 0$  и  $\varphi$ , заключенном в пределах  $0 \leq \varphi \leq \frac{\bar{\omega}_N}{2}$ , является зеркальным отражением относительно действительной оси графика той же функции при любом  $a \geq 0$ , но  $\varphi$ , заключенном в пределах  $-\frac{\bar{\omega}_N}{2} \leq \varphi \leq 0$ . Подобное свойство установлено Ю. М. Коршуновым в [Л. 4].

Обозначим через  $\varphi_1$  сдвиг фазы  $\varphi$ , когда он положителен, и через  $\varphi_2$ , когда он отрицателен. Термин «положительный» или «отрицательный» сдвиг фазы применим для обозначения того факта, что момент возникновения импульса запаздывает или опережает момент времени, при котором имеет место положительный максимум косинусоиды.

Кроме свойства 1 имеет место свойство 2: для нечетного фиксированного  $N$ , переменного значения  $a$  и  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ , связанных соотношением

$$\varphi_2 = -\frac{\bar{\omega}_N}{2} + \varphi_1,$$

график функции  $J(a, \varphi_2, N)$  совпадает с графиком функции  $J(a, \varphi_1, N)$ , но повернутым в положительном направлении на угол  $\frac{\bar{\omega}_N}{2} = \frac{\pi}{N}$ .

Из свойства 1 и 2 вытекают следующие рекомендации для построения графика коэффициента  $J(a, \varphi, N)$ :

1. При построении графика функции  $J(a, \varphi, N)$  при  $N$  четном следует предварительно построить график при  $0 \leq \varphi \leq \frac{\bar{\omega}_N}{2}$  и затем воспользоваться свойством 1 при построении этого графика в диапазоне сдвигов фаз  $-\frac{\bar{\omega}_N}{2} \leq \varphi \leq 0$ .

2. При построении графика функции  $J(a, \varphi, N)$  при  $N$  нечетном следует построить график при  $-\frac{\bar{\omega}_N}{2} \leq \varphi \leq 0$  и затем воспользоваться свойством 2

(при построении в диапазоне сдвигов фаз  $-\frac{\bar{\omega}_N}{2} \leq \varphi \leq -\frac{\bar{\omega}_N}{4}$ ) и свойством 1 (при построении графика при  $\varphi$ , заключенном в пределах  $\frac{\bar{\omega}_N}{4} \leq \varphi \leq \frac{\bar{\omega}_N}{2}$  и  $-\frac{\bar{\omega}_N}{4} \leq \varphi \leq 0$ ).

Вычисление значений функции  $J(a, \varphi, N)$  выполним с помощью метода, основанного на представлении многоступенчатого симметричного релейного элемента в виде суммы одноступенчатых характеристик с различными зонами нечувствительности. Для  $N$  четного этот метод изложен А. А. Косякиным в [Л. 3], в настоящей работе этот метод обобщен также на нечетные значения  $N$ .

При возникновении периодического режима с определенной частотой  $\bar{\omega}_N$  сигнал на выходе НИЭ имеет вид периодической решетчатой функции, значения которой в дискретные относительные моменты времени  $n = v$  имеют целочисленные значения  $\Phi[\alpha(v)]$  ( $v = 1, 2, \dots, N$ ).

Значения  $\Phi[\alpha(v)]$  определяют конфигурацию сигнала на выходе НИЭ. Одна и та же конфигурация сигнала на выходе НИЭ может быть получена при различных значениях амплитуды и фазы сигнала (2).

Представим многоступенчатую релейную характеристику  $\Phi[\alpha]$  в виде суммы одноступенчатых релейных характеристик  $\Phi_i$  с различными зонами нечувствительности:

$$\Phi[\alpha] = \sum_{i=0}^{\infty} \Phi_i[\alpha],$$

где

$$\Phi_i[\alpha] = \begin{cases} 1 & \text{при } \alpha \geq (i + \lambda), \\ 0 & \text{при } |\alpha| < (i + \lambda), \\ -1 & \text{при } \alpha \leq -(i + \lambda). \end{cases}$$

На рис. 2 представлена характеристика  $\Phi_0$  при  $\lambda = 0,5$  и изображен процесс прохождения сигнала

$$\alpha[\bar{t}] = a \cos\left(\frac{2\pi}{N}\bar{t} + \varphi\right)$$

через НИЭ с характеристикой релейного элемента  $\Phi_0$ .

При любом целом  $N$  периодический сигнал

$$\Phi_i\left[a \cos\left(\frac{2\pi}{N}\bar{t} + \varphi\right)\right]$$

на выходе одноступенчатой релейной характеристики  $\Phi_i$  может быть охарактеризован четверкой чисел  $m_{1i}, m_{2i}, m_{3i}$  и  $m_{4i}$ .

Обозначим через  $m_{1i}$  и  $m_{2i}$  числа положительных дискрет (рис. 3), расположенных соответственно слева и справа от момента  $n = 0$ . Обозначим, кроме

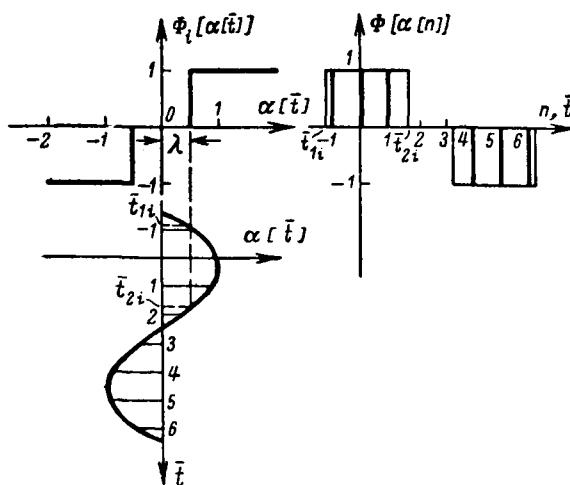


Рис. 2.

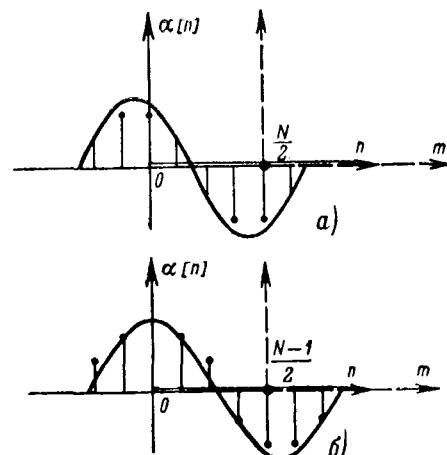


Рис. 3.

того, через  $m_{3i}$  и  $m_{4i}$  числа отрицательных дискрет, имеющих место соответственно слева и справа от момента  $n = n_1 = \frac{N-1}{2}$  при положительном сдвиге

фазы  $\varphi = \varphi_1$  и от момента  $n = n_2 = \frac{N+1}{2}$  при отрицательном сдвиге фазы  $\varphi = \varphi_2$ .

Четыре числа  $m_{1i}, m_{2i}, m_{3i}$  и  $m_{4i}$  удовлетворяют соотношениям:

при  $N$  четном

$$m_{1i} = m_{3i}, \quad m_{2i} = m_{4i},$$

а при  $N$  нечетном для значений  $\varphi = \varphi_1$  и  $\varphi = \varphi_2$ , расположенных в пределах  $0 \leq \varphi_1 \leq \frac{\bar{\omega}_N}{2}$  и

$-\frac{\bar{\omega}_N}{2} \leq \varphi_2 \leq 0$ , удовлетворяют соотношениям:

$$m_{3i}(\varphi_2) = m_{1i}(\varphi_1), \quad m_{3i}(\varphi_1) = m_{1i}(\varphi_2);$$

$$m_{4i}(\varphi_2) = m_{2i}(\varphi_1), \quad m_{4i}(\varphi_1) = m_{2i}(\varphi_2).$$

Полученные соотношения позволяют при любом  $N$  и заданных  $m_{1i}, m_{2i}, m_{3i}$  и  $m_{4i}$  построить график сигнала на выходе НИЭ.

Метод вычисления коэффициента  $J(a, \varphi, N)$ . Рассмотрим комплексную плоскость  $F = ae^{j\varphi}$ . В плоскости  $F$  область  $F_N$  возможных амплитуд  $a$  и сдвигов фаз  $\varphi$  периодических режимов определяется соотношениями

$$|\varphi| \leq \frac{\pi}{N} \quad \text{и} \quad \operatorname{Re}[ae^{j\varphi}] \geq \lambda, \quad (7)$$

где  $\lambda$  — величина зоны нечувствительности характеристики  $\Phi$ .

Выделим область значений  $a$  и  $\varphi$ , соответствующих одним и тем же формам сигналов на выходе НИЭ.

Прямые, разделяющие область возможных амплитуд и сдвигов фаз периодических режимов на подобласти, соответствующие определенным значениям  $m_{1i}$  и  $m_{2i}$ , описываются уравнениями:

$$a \cos\left(-\frac{2\pi}{N}m_{1i} + \varphi\right) = i + \lambda, \quad (8)$$

$$a \cos\left(\frac{2\pi}{N}m_{2i} + \varphi\right) = i + \lambda. \quad (9)$$

Система неравенств, связывающих значения  $m_{1i}$  и  $m_{2i}$  и позволяющих определить максимальные возможные значения  $m_{1i}$  и  $m_{2i}$ , имеет вид:

$$m_{1i}, m_{2i} \leq \begin{cases} E\left[\frac{N}{4}\right] & \text{при } N \text{ четном;} \\ E\left[\frac{N+1}{4}\right] & \text{при } N \text{ нечетном;} \end{cases} \quad (10)$$

$$m_{1i} + m_{2i} \leq \begin{cases} \frac{N}{2} - 1 & \text{при } N \text{ четном;} \\ \frac{N-1}{2} & \text{при } N \text{ нечетном;} \end{cases} \quad (11)$$

$$|m_{1i} - m_{2i}| \leq 1 \text{ при любом } N. \quad (12)$$

Используем полученные выше результаты для одноступенчатой релейной характеристики  $\Phi_i$  при определении формы сигнала на выходе НИЭ и вычислении функции  $J(a, \varphi, N)$  в случае многоступенчатой релейной характеристики. Решение этих задач состоит в выполнении следующей последовательности действий:

1. Представить многоступенчатую характеристику  $\Phi$  в виде суммы одноступенчатых характеристик  $\Phi_i$ .

2. Построить область  $F_N$ , пользуясь неравенствами (7).

3. Провести вертикальные прямые через точки  $i + \lambda (i=0, 1, \dots, l-1)$  до пересечения с границами области  $F_N$ . Каждая вертикальная полоса в плоскости  $F$  соответствует участку в образовании сигнала определенного числа одноступенчатых характеристик  $\Phi_i$ .

4. Построить прямые (8) и (9) при любых значениях  $m_{1i}$  и  $m_{2i}$ , удовлетворяющих неравенствам (10)–(12). Построение следует проводить в порядке возрастания значений  $m$ .

5. Сопоставить с каждой полученной в результате построения подобластю  $F_{Nk}$  значения чисел  $m_{1i}$  и  $m_{2i}$  ( $i=0, 1, \dots, l-1$ ), где  $l$  – число одноступенчатых характеристик, участвующих в образовании сигнала на выходе НИЭ.

6. Для четного  $N$  в результате выполнения пунктов 1–5 определяется искомая совокупность чисел  $m_{1i} = m_{3i}$  и  $m_{2i} = m_{4i}$  ( $i=0, 1, \dots, l-1$ ).

7. Для нечетного  $N$  значения  $m_{1i}$  и  $m_{2i}$  для некоторой амплитуды  $a$  и сдвига фазы  $\varphi$  определяются так же, как и для  $N$  четного. Значения  $m_{3i}$  и  $m_{4i}$  соответствуют тем же самым значениям амплитуды  $a$ , но сдвигу фазы, определяемому по формуле

$$\varphi^* = -\frac{\bar{\omega}_N}{2} + \varphi.$$

Для определения  $m_{1i}$ ,  $m_{2i}$ ,  $m_{3i}$  и  $m_{4i}$  одновременно по одной и той же подобласти  $F_{Nk}$  при  $N$  нечетном целесообразно провести наложение части области  $F_N$ , соответствующей

$$-\frac{\bar{\omega}_N}{2} \leq \varphi_2 \leq -\frac{\bar{\omega}_N}{4}$$

и значениям  $m = m_{3i}$  и  $m = m_{4i}$ , на часть области  $F_N$ , соответствующей

$$0 \leq \varphi_1 \leq \frac{\bar{\omega}_N}{4}$$

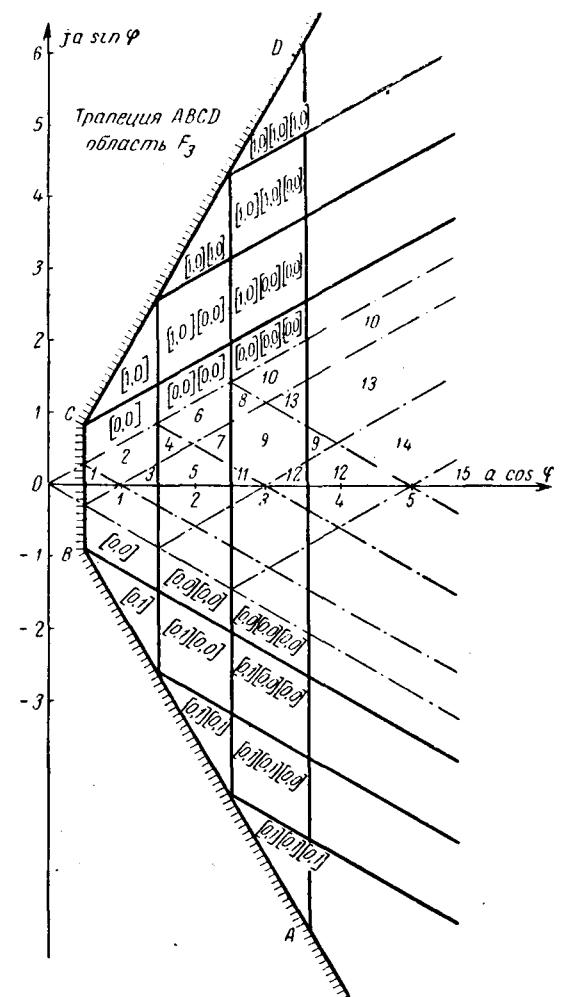


Рис. 4.

и значениям  $m = m_{1i}$  и  $m = m_{2i}$ . Получающееся в результате наложения вторичное деление подобластей  $F_{Nk}$  позволяет определить для амплитуды  $a$

и сдвига фазы  $0 \leq \varphi_1 \leq \frac{\bar{\omega}_N}{4}$  значения чисел  $m_{1i}$ ,  $m_{2i}$ ,  $m_{3i}$  и  $m_{4i}$ .

8. Необходимо получить график сигнала на выходе НИЭ для каждой подобласти по найденным значениям чисел  $m_{1i}$ ,  $m_{2i}$ ,  $m_{3i}$ ,  $m_{4i}$  и внести его в таблицу типа 1 и 2.

Появление дискрет на выходе НИЭ целесообразно обозначать следующим образом ( $N=2-6$ ):

А. Участие  $i$ -й одноступенчатой характеристики в образовании сигнала на выходе НИЭ, связанное с увеличением числа дискрет на единицу только в начале отсчета времени ( $n=0$ ) обозначим через  $[0, 0]$ .

Б. Участие в образовании сигнала  $i$ -й характеристики при увеличении числа дискрет на единицу в моменты  $n=0$  и  $n=-1$  или в моменты  $n=0$  и  $n=1$  одновременно обозначим соответственно через

$\dots [1, 0] \dots$  и  $\dots [0, 1] \dots$

В. Если значения  $a$  и  $\varphi$  изменяются так, что  $F$  находится в одной из подобластей (рис. 4), то график сигнала на выходе НИЭ не изменяется.

Г. Переход через вертикальную прямую означает, что в зависимости от возрастания или уменьшения  $a$  количество ступеней увеличивается или уменьшается на единицу. При этом появление дискрет может произойти только вначале, например, вместо  $[1,0] \dots [1,0] \dots [0,0]$  будем иметь  $[1,0] \dots [1,0] \dots [0,0] [0,0]$ .

Д. Переход через прямую (8) вверх или через прямую (9) вниз означает соответственно появление одной дискреты слева или справа от начала отсчета времени  $n=0$ .

Е. Обозначения подобластей для  $N$  нечетного целесообразно проводить по правилам пункта 5, но отдельно, указывая распределение дискрет на положительном и отрицательном полуинтервале, например  $[0,0][0,0][0,0]$ ,  $[0,1][0,0]$ . Здесь слева от запятой указано распределение дискрет относительно  $n=0$  на положительном полуинтервале, справа — распределение дискрет относительно  $n_1 = \frac{N-1}{2}$  на отрицательном полуинтервале.

9. Вычислить значения  $b$  и  $\varphi$  при фиксированном  $N$  и значениях  $a$  и  $\varphi$ , принадлежащих каждой из полученных подобластей, пользуясь найденными в пункте 8 графиками сигнала.

Деление областей  $F_N$  при  $N=3$  и  $N=4$  на подобласти, соответствующие различным графикам сигнала на выходе НИЭ, показано на рис. 4.

Значения  $m_{1i}$ ,  $m_{2i}$ ,  $m_{3i}$  и  $m_{4i}$ , графики сигнала, величины  $b$  и  $\varphi$  для каждой подобласти  $F_N$  ( $N=3, 4$ ) сведены в табл. 1 и 2.

Использование метода логарифмических характеристик для исследования периодических режимов в ЦАС. Выполним  $\omega$ -преобразование передаточной функции импульсной системы в уравнении (6) с по-

Таблица 2

$N=4$	Обозначение	$b$	$U\Phi$	График
1	$[0, 0]$	1	0	
2	$[1, 0]$	1,41	45	
3	$[0, 0] [0, 0]$	2	0	
4	$[1, 0] [1, 0]$	1,59	27	
5	$[1, 0] [1, 0]$	0,71	45	
6	$[0, 0] [0, 0] [0, 0]$	3,03	0	
7	$[1, 0] [0, 0] [0, 0]$	3,13	18	
8	$[1, 0] [1, 0] [0, 0]$	3,57	33	

мощью формулы (1а). Тогда уравнение гармонического баланса примет следующий вид:

$$J(a, \varphi, N) = \bar{W}^{-1}(j\omega^* N). \quad (13)$$

Введем следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} L(\omega^*) &= 20 \lg / \bar{W}^{-1}(j\omega^*), \\ \psi(\omega^*) &= \arg \bar{W}^{-1}(j\omega^*), \\ R(a, \varphi, N) &= 20 \lg \frac{b}{a}, \\ \theta(a, \varphi, N) &= \pi + \vartheta - \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Уравнение (13) может быть записано в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} L(\omega^* N) &= R(a, \varphi, N), \\ \psi(\omega^* N) &= \theta(a, \varphi, N). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Уравнения (15) могут быть использованы при определении периодических режимов в ЦАС графическим методом.

Для использования метода логарифмических характеристик необходимо иметь набор графиков функций  $R(a, \varphi, N)$  и  $\theta(a, \varphi, N)$  для фиксированного значения  $N \geq 2$ , построенных в зависимости от  $a$ .

Графики функции  $R(a, \varphi, N)$  и  $\theta(a, \varphi, N)$  при  $N=3$  и  $a \geq 5$  в зависимости от вида графика сигнала на выходе НИЭ построены на рис. 5. Построение проводилось отдельно для каждой подобласти, соответствующей определенному графику сигнала.

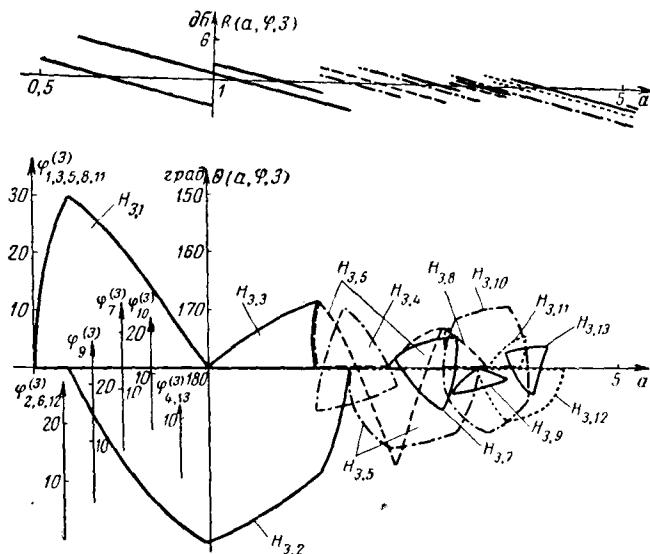
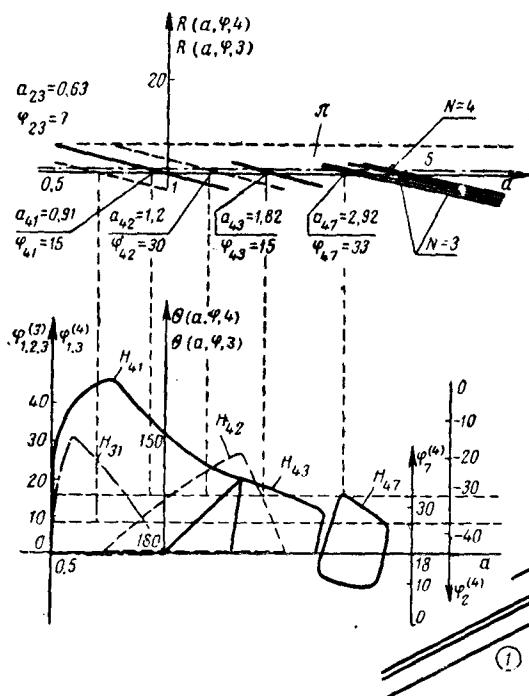


Рис. 5.

В результате анализа функций  $R(a, \varphi, N)$  и  $\theta(a, \varphi, N)$  в зависимости от  $a$  при фиксированном  $N$  и  $\varphi$ , заключенном в отмеченные выше пределах, можно сделать следующие выводы:

1. При неограниченном (ограниченном) числе  $s$  график функции  $R(a, \varphi, N)$  представляется совокупностью неограниченного числа отрезков прямых (ограниченного числа отрезков и  $(s+1)$ -й полупрямых) с наклоном  $20 \text{ дБ/дек}$  и является многозначной функцией.

2. При неограниченном (ограниченном) числе  $s$  график функции  $\theta(a, \varphi, N)$  является совокупностью неограниченного числа замкнутых областей (ограниченного числа замкнутых областей и  $(s+1)$ -й областей, замыкающихся через бесконечно удаленную точку). Функция  $\theta(a, \varphi, N)$  многозначна.



3. При возрастающем  $N$  графики функций  $R(a, \varphi, N)$  располагаются как угодно близко к непрерывной кривой графика коэффициента усиления нелинейного элемента с многоступенчатой релейной характеристикой. Область  $\theta(a, \varphi, N)$  сливается с прямой  $\theta = \pi$ .

4. Из построенных графиков функций  $R(a, \varphi, N)$  при  $N \geq 2$  (целом) для различных конфигураций сигнала на выходе НИЭ следует, что при этих значениях  $N$  справедливо

$$R(a, \varphi, N) \leq 6 \text{ дБ.}$$

Полученные графики функций  $R(a, \varphi, N)$  и  $\theta(a, \varphi, N)$  применимы для определения возможных периодических режимов в ЦАС, пользуясь уравнениями (15).

Из системы уравнений (15), принимая во внимание последнее свойство графиков функций  $R(a, \varphi, N)$  и  $\theta(a, \varphi, N)$ , следует, что для отсутствия периодических режимов в ЦАС с частотой  $\omega_N$  достаточно, чтобы имело место

$$L(\omega_N^*) > 6 \text{ дБ.} \quad (16)$$

На основании вышеизложенного графический метод определения возникающих в ЦАС периодических режимов состоит в выполнении следующих действий:

1. Необходимо построить графики функций  $L(\omega^*)$  и  $\psi(\omega^*)$ .

2. Проводится горизонтальная полоса  $\pi$  ширины 6 дБ, проходящая через ординаты 0 и 6 дБ (рис. 6).

3. Отмечаются на оси  $\omega^*$  точки, соответствующие псевдочастотам

$$\omega_N^* = \frac{2}{T} \operatorname{tg} \frac{\omega_N T}{2},$$

где  $\omega_N = \frac{2\pi}{NT}$  и  $N \geq 2$  (целое).

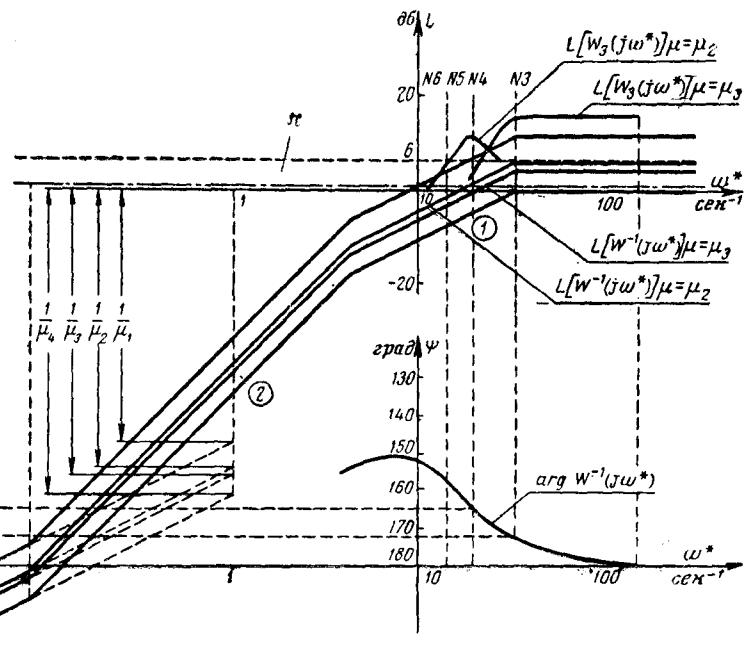


Рис. 6.

4. Проводятся ординаты  $L(\omega^*_N)$  и  $\psi(\omega^*_N)$  при тех значениях  $N=N_i (i=1, \dots, p)$ , при которых точки  $[L(\omega^*_N), \omega^*_N]$  принадлежат горизонтальной полосе  $\pi$ .

5. Производится построение графиков функций  $R(a, \varphi, N)$  и  $\theta(a, \varphi, N)$  при фиксированном  $N=N_i (i=1, \dots, p)$  и значениях  $a$  и  $\varphi$ , принадлежащих подобластям определенных конфигураций сигналов на выходе НИЭ.

6. Проводятся горизонтальные прямые через точки  $[L(\omega^*_N), \omega^*_N]$  и  $[\psi(\omega^*_N), \omega^*_N]$  до пересечения с графиками  $R(a, \varphi, N_i)$  и  $\theta(a, \varphi, N_i)$ .

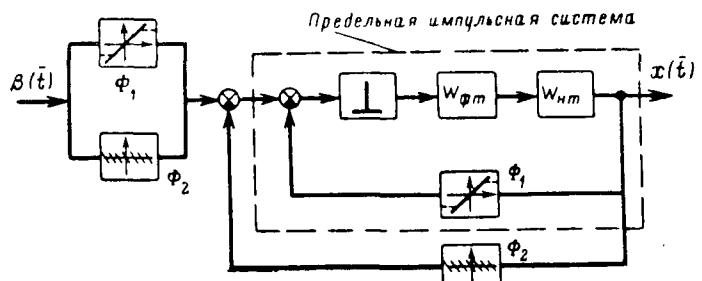


Рис. 7.

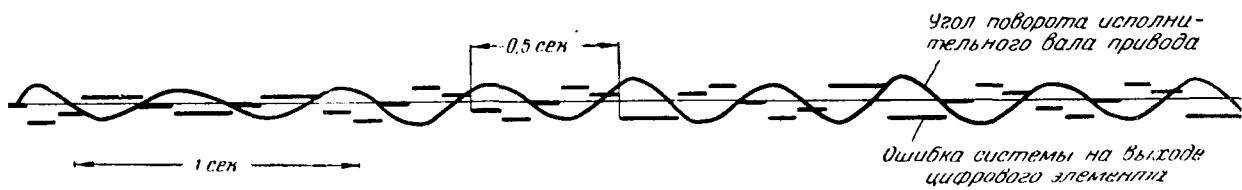


Рис. 8.

7. Находятся амплитуды  $a_{ij} (j=1, \dots, q)$  периодических режимов, определяемые точками пересечения прямых с графиками  $R(a, \varphi, N_i)$  и соответствующие частоте  $\omega_{N_i}$  периодического режима.

8. Определяются сдвиги фазы  $\varphi_{ij}$  периодических режимов путем нахождения точки пересечения вертикальных прямых, проходящих через точки, соответствующие  $a=a_{ij}$ , и горизонтальной прямой, проходящей через точку  $(L(\omega^*_N), \omega^*_N) (i=1, \dots, p)$ .

Значения сдвигов фазы определяются по шкалам (рис. 6), соответствующим подобластям, к которым принадлежат указанные точки пересечения.

Представим ЦАС в виде замкнутой импульсной системы (рис. 7), охваченной нелинейной обратной связью с характеристикой  $\Phi_2$ . Следуя Я. З. Цыпкину [Л. 2], назовем замкнутую импульсную систему предельной импульсной системой.

При наличии решений уравнений гармонического баланса резонансные свойства замкнутой предельной ИАС, соответствующей ЦАС, оказываются явно выраженным. Частота  $\omega_p$ , при которой имеет место явно выраженный резонансный пик, совпадает с частотой собственных колебаний ИАС.

Допустим, что при наличии решений уравнений гармонического баланса собственная частота  $\omega_c$  заключена в пределах

$$\omega_{N+1} \leq \omega_p = \omega_c \leq \omega_N.$$

По положению резонансного пика ЛАЧХ замкнутой предельной ИАС из всего множества частот, определяемых графическим методом, можно выделить только две частоты, при которых в действительности могут возникнуть периодические режимы.

Экспериментальный анализ показывает, что из двух частот  $\omega_{N+1}$  и  $\omega_N$  основную роль играет частота, значение которой менее отличается от частоты  $\omega_p = \omega_c$ .

Если при некотором значении коэффициента усиления разомкнутой ИАС справедливо  $\omega_p \neq \omega_N$ ,

то частота колебаний на выходе ЦАС в неустановившемся состоянии изменяется в пределах от  $\omega_{N+1}$  до  $\omega_N$ .

Так как наличие ИАС обусловливает в ЦАС колебания с частотой  $\omega_c$ , по основному свойству ЦАС установившиеся колебания могут иметь место только с частотой, кратной частоте дискретности, то при

$$\omega_p \neq \omega_N$$

колебания в ЦАС установиться не могут. Таким образом, ЦАС находятся под действием внутренних возмущений, связанных с тем, что собственная частота  $\omega_c = \omega_p$  в общем случае не совпадает с частотой  $\omega_N$  возможного периодического режима.

Поэтому в ЦАС возникают режимы, характеризующиеся переходом от конфигурации сигнала на выходе НИЭ, соответствующей  $\omega_{N+1}$  к конфигурации, соответствующей  $\omega_N$ . Эти режимы носят характер биений колебаний.

На рис. 8 представлены осциллограммы, иллюстрирующие периодические режимы в электронной модели ЦАС при отсутствии внешних воздействий. Осциллограммы подтверждают, что для ЦАС характерны периодические режимы в виде биений колебаний.

**Выводы.** 1. ЦАС устойчива, и периодические режимы в ней не возникают, если замкнутая предельная ИАС устойчива и графических решений уравнения гармонического баланса  $a_{ij}$ ,  $\varphi_{ij}$  и  $N_j$  нет ни при одном  $N_j$ .

2. В ЦАС возможны биения с частотой и амплитудой, заключенными в пределах

$$\omega_c \leq \omega \leq \omega_{Nj}, \\ a_m \leq a \leq a_M,$$

где

$$a_m = \min \{a_{ij}\}; \\ a_M = \max \{a_{ij}\},$$

если существуют графические решения  $a_{ij}$ ,  $\varphi_{ij}$ ,  $N_j$  и отсутствуют решения  $a_{ij+1}$ ,  $\varphi_{ij+1}$ ,  $N_{j+1}$  в случае

устойчивой ИАС при неограниченном числе  $s$  и безразлично к устойчивости ИАС при ограниченном числе  $s$ .

3. В ЦАС возможны биения с частотой и амплитудой, заключенными в пределах

$$\omega_{N_j+1} \leq \omega \leq \omega_{N_j},$$

$$\min(a_{m, N_j}, a_{m, N_j+1}) \leq a \leq \max(a_{M, N_j}, a_{M, N_j+1}),$$

где

$$a_{m, N_j} = \min\{a_{ij}\}; \quad a_{m, N_j+1} = \min\{a_{i, j+1}\};$$

$$a_{M, N_j} = \max\{a_{ij}\}; \quad a_{M, N_j+1} = \max\{a_{i, j+1}\},$$

если существуют графические решения  $a_{ij}$ ,  $\varphi_{ij}$ ,  $N_j$  и  $a_{i, j+1}$ ;  $\varphi_{i, j+1}$ ;  $N_j + 1$  в случае устойчивой замкнутой предельной ИАС при неограниченном числе  $s$  ступени характеристики  $\Phi$  и безразлично к устойчивости ИАС при  $s$  ограниченном.

4. ЦАС неустойчива при неустойчивой ИАС и при неограниченном числе  $s$  ступени характеристики  $\Phi$ .

5. Приведенные в статье методы исследования позволяют провести синтез ЦАС таким образом, что периодические режимы не возникнут. Синтез целесообразно проводить с помощью ЛЧХ посредством придания желаемых свойств импульсной системе, соответствующей цифровой.

### Литература

- Симкин М. М., Периодические режимы в системах с нелинейными импульсными элементами, Доклады АН СССР, т. XXXI, 1960, № 6.
- Цыпкин Я. З., Элементы теории цифровых автоматических систем, Труды I Конгресса международной федерации по автоматическому управлению, 1961.
- Балтрушевич А. В., Косякин А. А. и Круг Г. К., Динамика цифровых автоматических систем, Труды МЭИ, Автоматика и телемеханика, вып. 14, 1962.
- Коршунов Ю. М., О построении эквивалентного комплексного коэффициента усиления нелинейного импульсного элемента, «Автоматика и телемеханика», т. XXIII, 1962, № 5.
- Блейз Е. С., Паршева И. М., Феклисов Г. И. и Чемоданов Б. К., Анализ и синтез импульсных автоматических систем методом логарифмических характеристик, Труды ЦНИИ, вып. 7, 1962.

[21.10.1963]



УДК 621.375.3

## Повышение быстродействия магнитного усилителя с выходом на постоянном токе, работающего на индуктивную нагрузку

Инж. О. Н. МЕЛЬНИКОВ

Свердловск

К магнитным усилителям с выходом на постоянном токе часто подключают индуктивную нагрузку (обмотки реле, возбуждения электрической машины и т. п.). Применяемые при этом схемы с мостовым выпрямителем и схемы со средней точкой считаются эквивалентными (при условии шунтирования нагрузки на схеме, изображенной на рис. 1,б, выпрямителем).

Известно [Л. 1], что быстродействие схемы, изображенной на рис. 1,а, определяется запаздыванием собственно магнитного усилителя, что в пределе составляет половину периода, и постоянной времени нагрузки. Однако этот вывод справедлив только при сопротивлении обмоток усилителя  $r$ , пренебрежимо малом по сравнению с сопротивлением нагрузки  $R$ . Если учитывать сопротивления обмоток, то постоянная времени при включении магнитного усилителя уменьшается, так как она определяется индуктивностью  $L$  и суммой сопротивлений  $r$  и  $R$ . При отключении цепь замыкается через выпрямительный мостик и ток спадает с постоянной времени, зависящей от нагрузки. Таким образом, при включении усилителя имеется довольно значительная форсировка, отсутствующая при его отключении.

Схема, изложенная на рис. 1,б, обеспечивает тот же результат при наличии шунтирующего вен-

тиля (показан пунктиром). Без этого вентиля увеличивается запаздывание собственно магнитного усилителя [Л. 1], характеристика вход — выход исказится и может возникнуть релейный режим [Л. 2].

Как это отмечено в [Л. 1 и 2], тот же результат может быть достигнут при шунтировании нагрузки емкостью вместо вентиля. Произведенный нами анализ работы схемы, представленной на рис. 1,б, показал, что последний вывод является строгим только для случая  $r=0$ . При конечном значении отношения  $\frac{R}{r}$  замена вентиля емкостью, практически не изменяя постоянной времени при включении магнитного усилителя, значительно повышает быстродействие схемы при его отключении.

Рассмотрение этого вопроса приведем в основном для случая  $\frac{L}{R} \gg T$ . Во всех дальнейших расчетах пренебрежем индуктивностью рассеяния (остаточной индуктивностью магнитного усилителя), так как учет этой индуктивности приводит к чрезмерному усложнению, а экспериментальная проверка показала возможность такого упрощения. Отметим, что этот случай является типичным для силовых магнитных усилителей, когда к ним подключены обмотки возбуждения электрических ма-

шин, постоянная времени которых может достигать величин от долей секунды до нескольких секунд. Первоначально примем еще более жесткое условие  $\frac{L}{R} \gg RC \gg T$ . Для упрощения анализа рассмотрим переходный процесс только для случая отключения магнитного усилителя из полностью открытого состояния.

Рассмотрим физическую сущность процесса. Принятое выше условие означает, что контур  $LCR$  является колебательным. Поэтому некоторое время спустя после отключения магнитного усилителя напряжение на конденсаторе проходит через нуль и изменяет знак. Предполагая, что усилитель работает при нормальном возбуждении, в первый же полупериод после изменения знака напряжения на емкости он приоткроется, причем угол открытия определяется средним напряжением на емкости в текущем полупериоде. Напряжение на конденсаторе будет продолжать повышаться до тех пор, пока среднее значение разрядного тока не сравняется с зарядным током (током нагрузки). Первая часть переходного процесса на этом заканчивается, и дальше ток нагрузки будет спадать с постоянной времени, определяемой значением противо-э. д. с.  $Ri$  и  $u_C$ .

Сравнив этот переходный процесс с режимом, возникающим при наличии разрядного вентиля, заметим, что он удлиняется на время, необходимое для перезаряда конденсатора, а разряд индуктивности ускоряется из-за наличия дополнительной противо-э.д.с. Совершенно очевидно, что при достаточно большом значении отношения  $\frac{L}{R^2C}$  время перезаряда емкости будет много меньше времени затухания тока в индуктивности и длительность процесса в целом уменьшится.

Существует оптимальное значение для емкости. При неограниченном ее увеличении произведение  $RC$  станет больше  $\frac{L}{R}$  и время разряда будет определяться величиной  $RC$ . При уменьшении емкости ниже некоторого предельного значения влияние ее становится незначительным и возникает чисто индуктивный режим. Выполнение неравенства  $\frac{L}{R} \gg RC \gg T$  исключает обе крайности и в качестве первого приближения является приемлемым.

Принятое допущение означает, что напряжение на емкости за полупериод изменяется мало. Примем его в течение полупериода постоянным и рассмотрим случай мгновенного отключения тока управления (предполагается, что током смещения магнитный усилитель запирается). Здесь и ниже предполагается также, что в цепях управления и смещения нет короткозамкнутых обмоток и что, следовательно, ток рабочих обмоток в следующем полупериоде практически становится равным нулю.

Среднее значение тока нагрузки в этом случае равно:

$$i_h = \frac{\omega}{\pi r} \left[ \int_{t_1}^{t_2} \sin \omega t dt - u'_C \int_{t_1}^{t_2} dt \right], \quad (1)$$

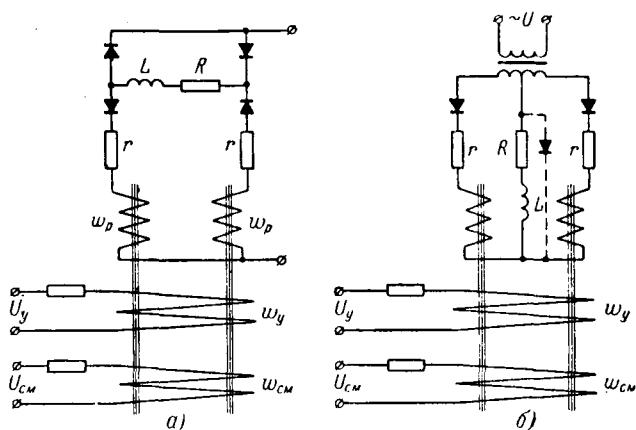


Рис. 1. Обычная (мостиковая) (a) и двухполупериодная (b) схемы включения магнитного усилителя.

где  $r$  — сопротивление рабочих обмоток;

$\sin \omega t$  — единичное напряжение питания;

$u'_C$  — напряжение на емкости.

Проинтегрировав уравнение (1), получим:

$$i_h = \frac{1}{\pi r} [\cos \vartheta_1 - \cos \vartheta_2 - u'_C (\vartheta_2 - \vartheta_1)], \quad (2)$$

где  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  углы отсечки тока, определяемые из равенства

$$\sin \vartheta_{1,2} = u'_C. \quad (3)$$

После отключения магнитного усилителя первая часть переходного процесса заканчивается установлением разрядного тока, равного току нагрузки:

$$i_p = \frac{\omega}{\pi r} \left[ \int_{t'_1}^{t'_2} \sin \omega t dt + u'_C \int_{t'_1}^{t'_2} dt \right]$$

или

$$i_p = \frac{1}{\pi r} [\cos \vartheta'_1 - \cos \vartheta'_2 + u'_C (\vartheta'_2 - \vartheta'_1)], \quad (4)$$

где  $u'_C$  — напряжение на емкости (другой полярности);

$\vartheta'_2$  — угол отсечки, определяемый из равенства

$$\sin \vartheta'_2 = -u'_C. \quad (5)$$

Угол открытия магнитного усилителя  $\vartheta'_1$  определяется из условия, что сердечник насыщается под воздействием суммы напряжения  $\sin \omega t$  и  $u'_C$ . Предполагая, что усилитель работает с нормальным возбуждением, т. е. что под воздействием только переменного напряжения насыщение сердечника наступает в конце полупериода, можем записать:

$$\int_{\vartheta_0}^{\vartheta'_1} (\sin \omega t + u'_C) dt = \int_0^{\pi} \sin \omega t dt, \quad (6)$$

где  $\vartheta_0$  определяется, как и  $\vartheta'_2$ , из выражения  $\sin \vartheta_0 = -u'_C$ . После интегрирования получим:

$$\cos \vartheta_0 - \cos \vartheta'_1 + u'_C (\vartheta'_1 - \vartheta_0) = 2. \quad (7)$$

Учитывая, что реальные значения  $u_C$ , а следовательно, и  $\sin \vartheta_{1,2}$ , не превышают 0,5, примем:

$$\left. \begin{array}{l} \vartheta_1 \approx \sin \vartheta_1 = u_C \\ \vartheta_2 \approx \pi - u_C \end{array} \right\} \quad (8)$$

и

Уравнение (2) преобразуется к следующему виду:

$$i_h = \frac{1}{\pi r} [2\sqrt{1-u_C^2} - u_C(\pi - 2u_C)]. \quad (9)$$

С такими же допущениями из выражений (4) и (7) получаем:

$$i_p = \frac{1}{\pi r} [2\sqrt{1-(u'_C)^2} + u'_C(\pi + 2u'_C) - 2]. \quad (10)$$

Приравняв равенства (9) и (10), окончательно получим:

$$\begin{aligned} 2u_C^2 + 2\sqrt{1-u_C^2} - \pi u_C &= 2(u'_C)^2 + \\ &+ 2\sqrt{1-(u'_C)^2} + \pi u'_C - 2. \end{aligned} \quad (11)$$

Начальная форсировка при отключении магнитного усилителя характеризуется следующим выражением:

$$k = \frac{R i_p + u'_C}{R i_p}. \quad (12)$$

Для оценки величины  $u'_C$  подставим в уравнение (11) типичное для  $u_C$  значение, равное примерно 0,45. Решив полученное уравнение, найдем, что

$$u'_C = 0,23.$$

Учитывая малое значение  $u'_C$  по сравнению с единицей, получим из формулы (10):

$$i_p = \frac{1}{\pi r} [\pi u'_C + (u'_C)^2]$$

или

$$r i_p = u'_C + \frac{(u'_C)^2}{\pi}. \quad (13)$$

Как это следует из формулы (13),  $u'_C$  при затухании тока в нагрузке стремится к предельному значению  $u'_C = ri$ . Максимальное отклонение  $u'_C$  от этого значения не превышает  $\frac{0,23}{\pi}$ , или 7%. Подставив  $u'_C = ri$  в равенство (12), найдем:

$$k = \frac{R+r}{R}. \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что форсировка с точностью до сделанного выше приближения остается постоянной в течение всего процесса [точнее, несколько увеличивается, стремясь к предельному значению, определяемому выражением (14)]. Кроме того, так как форсировка практически не зависит от величины тока, все предыдущие выводы остаются в силе для случая отключения магнитного усилителя при любом промежуточном значении тока нагрузки.

Приведенный выше анализ показывает, что для больших значений индуктивности использование шунтирующей емкости в схеме магнитного усилителя со средней точкой значительно повышает бы-

стродействие на отпускание. Однако иногда постоянная времени индуктивной цепи даже в первом приближении не может считаться бесконечно большой и целесообразность применения подобной схемы в этом случае может вызвать сомнение, так как величина  $\frac{L}{R}$  становится сравнимой с  $RC$  и, следовательно, запаздыванием процесса на время перезаряда емкости здесь пренебрегать нельзя. Ввиду этого представляет интерес определение минимального значения емкости, обеспечивающей сохранение форсированного режима при отключении усилителя.

Так как строгое определение этой величины затруднительно, примем за минимально возможное значение емкости такое ее значение, при котором еще нет чисто индуктивного режима (при прохождении напряжения питания через нуль ток в рабочих обмотках должен быть равен нулю). Минимальное значение емкости, при котором это условие будет соблюдено, определяется следующим равенством (для  $\vartheta=0$  и  $\vartheta=\pi$ ):

$$u_C(\vartheta) = 0. \quad (15)$$

Если найденное таким путем значение емкости одновременно обеспечит получение форсированного режима, будем считать, что это и есть искомая величина, так как время перезаряда емкости при этом будет минимальным.

Ток в рабочих обмотках магнитного усилителя равен:

$$i_p = \frac{\sin \omega t - u_C}{r}. \quad (16)$$

Напряжение на емкости с учетом принятого условия (15) может быть вычислено по формуле (17):

$$u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt. \quad (17)$$

Приняв ток нагрузки  $i_h$  в течение полупериода постоянным ( $L$  — достаточно велико), можно записать:

$$\left. \begin{array}{l} i_c = i_p - i_h \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{di_p}{dt} \end{array} \right\} \quad (18)$$

Из уравнений (16), (17) и (18) получаем:

$$\frac{di_c}{dt} + \frac{1}{rC} i_c = \frac{\omega}{r} \cos \omega t. \quad (19)$$

Решение этого уравнения имеет следующий вид:

$$i_c = A e^{-\frac{t}{rC}} + \frac{\beta P}{r} \cos \omega t + \frac{\beta^2 P}{r} \sin \omega t, \quad (20)$$

где  $\beta = \omega r C$ ;

$$P = \frac{1}{1 + (\omega r C)^2}.$$

Используя выражение

$$\int_0^\pi i_c dt = 0, \quad (21)$$

а также граничные условия, вытекающие из принятых ограничений

$$i_c(0) = i_c(\pi) = -i_h, \quad (22)$$

определим соотношения между коэффициентами:

$$\left. \begin{aligned} A + \frac{\beta P}{r} &= -i_h; \\ Ae^{-\frac{\pi}{\beta}} - \frac{\beta P}{r} &= -i_h. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Из равенства (23) получаем:

$$e^{-\frac{\pi}{\beta}} = \frac{i_h - \frac{\beta P}{r}}{i_h + \frac{\beta P}{r}}. \quad (24)$$

Не пытаясь решать это уравнение в общем виде, отметим, что ожидаемое значение  $\beta$  значительно меньше единицы. Это следует из того, что предполагаемая величина  $\omega rC$  равна примерно единице или меньше ее, а сопротивление обмоток  $r$  меньше (как правило) сопротивления нагрузки  $R$ . В этом случае  $e^{-\frac{\pi}{\beta}}$  в уравнении (24) может быть принято равным нулю и само уравнение сводится к следующему выражению:

$$\frac{\beta P}{r} = i_h. \quad (25)$$

Если полученное при решении этого упрощенного уравнения значение  $\beta$  подтвердит справедливость принятого допущения  $e^{-\frac{\pi}{\beta}} \approx 0$ , то более точного решения не потребуется.

Найдем величину тока нагрузки  $i_h$ . Так как  $u_C(0)$  и  $u_C(\pi)$  равны нулю, то среднее значение напряжения за полупериод и ток нагрузки соответственно равны:

$$\begin{aligned} u_{ep} &= \frac{2}{\pi}; \\ i_h &= \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{R+r}. \end{aligned} \quad (26)$$

Из уравнений (25) и (26) окончательно получим:

$$\frac{\omega rC}{1 + (\omega rC)^2} = \frac{2}{\pi} \frac{r}{R+r}. \quad (27)$$

Приняв  $\beta$  за независимую переменную, вычислим некоторые величины, которые понадобятся в дальнейшем (табл. 1).

Таблица 1

$\omega rC$ ( $\beta$ )	$\frac{1}{1 + (\omega rC)^2}$ ( $P$ )	$\frac{\omega rC}{1 + (\omega rC)^2}$ ( $\beta P$ )	$\frac{r}{R}$ ( $\alpha$ )	$\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)$
0,05	0,998	0,0499	0,085	0,588
0,10	0,990	0,099	0,1835	0,545
0,15	0,978	0,146	0,297	0,505
0,20	0,9615	0,192	0,433	0,462
0,25	0,940	0,235	0,5875	0,425
0,30	0,916	0,275	0,760	0,395
0,35	0,890	0,312	0,960	0,364
0,40	0,862	0,345	1,180	0,339
0,45	0,831	0,374	1,425	0,316
0,50	0,800	0,400	1,690	0,296

Максимальное значение  $\alpha$  не превышает в реальных усилителях 0,8—1,0, что соответствует значе-

нию  $\beta \approx 0,30 \div 0,35$  и  $e^{-\frac{\pi}{\beta}} = 2,8 \cdot 10^{-5} \div 1,25 \cdot 10^{-4}$ . Таким образом, принятые допущения оказались достаточно строгим.

Перейдем к рассмотрению режима гашения. Так как вычисленное значение  $\omega rC$  получилось достаточно малым, можно с полным основанием считать, что первая часть переходного процесса — перезаряд емкости — завершится в течение одного полупериода. Рассмотрим этот полупериод.

Напряжение на емкости при  $\vartheta = 0$  равно нулю. Конденсатор заряжается током  $i_h$ , ток по рабочим обмоткам не протекает. После того как сердечник насыщен, конденсатор начинает разряжаться на сопротивление  $r$  (зарядный ток  $i_h$  сохраняется.)

Определим момент открытия магнитного усилителя. Напряжение на конденсаторе характеризуется выражением:

$$u'_C = \frac{1}{C} \int_0^{\vartheta} i_h dt = \frac{i_h}{C} t = \frac{i_h}{\omega C} \vartheta, \quad (28)$$

где  $\vartheta = \omega t$ .

Момент открытия определяется из следующего равенства:

$$\int_0^{\vartheta_1} \sin \omega t dt + \frac{i_h}{C} \int_0^{\vartheta_1} t dt = \int_0^{\pi} \sin \omega t dt. \quad (29)$$

Проинтегрировав его, найдем:

$$\frac{i_h}{2\omega C} \vartheta_1^2 - \cos \vartheta_1 = 1. \quad (30)$$

Используя равенство (25), получим:

$$\frac{P}{2} \vartheta_1^2 - \cos \vartheta_1 = 1. \quad (31)$$

При реальных значениях  $\beta P$  примерно равно единице, а  $\vartheta_1$  близко к  $\frac{\pi}{2}$ . Заменяя в выражении (31)  $\vartheta_1$  на  $\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)$ , где  $\varphi$  — смежный угол, и принимая  $\sin \varphi \approx \varphi$ , получим:

$$P\varphi^2 - (P\pi + 2)\varphi + \left(\frac{P\pi^2}{4} - 2\right) = 0. \quad (32)$$

Откуда

$$\varphi = \frac{\frac{P\pi}{2} + 1 - \sqrt{P(\pi + 2) + 1}}{P}. \quad (33)$$

Запишем уравнение разряда конденсатора после насыщения сердечника:

$$\frac{du''_C}{dt} = -\frac{i_C}{C}, \quad (34)$$

где

$$i_C = i_p - i_h = \frac{\sin \omega t + u''_C}{r} - \frac{\beta P}{r}. \quad (35)$$

Подставляя уравнение (35) в (34) получаем:

$$\frac{du''_C}{dt} + \frac{u''_C}{rC} = -\frac{1}{rC} \sin \omega t + \frac{\beta P}{rC}. \quad (36)$$

Решением этого уравнения является следующее выражение:

$$u''_C = Ae^{-\frac{t}{RC}} - P \sin \omega t + \beta P \cos \omega t + \beta P.$$

Если заменить в нем  $t$  на  $\vartheta$ , то

$$u''_C = Ae^{-\frac{\vartheta}{P}} - P \sin \vartheta + \beta P \cos \vartheta + \beta P. \quad (37)$$

Так как это уравнение характеризует режим, начиная с угла  $\vartheta_1$ , его можно записать в следующем виде:

$$u''_C = A'e^{-\frac{\vartheta-\vartheta_1}{P}} - P \sin \vartheta + \beta P \cos \vartheta + \beta P, \quad (38)$$

где  $A' = Ae^{-\frac{\vartheta_1}{P}}$ .

Подставив в формулу (38) значение  $u_C$  из выражения (28) в точке  $\vartheta_1$ , получим:

$$A' = P\vartheta_1 + P \sin \vartheta_1 - \beta P \cos \vartheta_1 - \beta P \quad (39)$$

или с учетом принятых допущений,

$$A' = P \left[ \left( \frac{\pi}{2} + 1 - \beta \right) - (1 + \beta) \varphi - \frac{1}{2} \varphi^2 \right]. \quad (40)$$

На основании уравнений (28) и (38) можно определить напряжение на конденсаторе в течение всего (первого после отключения) полупериода.

Необходимо отметить, что при реальных значениях  $\beta$   $u''_C = 0$  при  $\vartheta = \pi$ ; следовательно, следующий полупериод имеет те же начальные условия. Это значит, что процесс устанавливается в первый же полупериод после отключения магнитного усилителя.

Уменьшение тока в индуктивности за полупериод характеризуется следующим выражением:

$$L\Delta i_H = - \int_0^\pi (Ri_H + u_C) dt = - \frac{1}{\omega} \int_0^\pi (Ri_H + u_C) d\vartheta. \quad (41)$$

Приняв, как это было сделано выше, что  $\Delta i_H \ll i_H$ , получим:

$$L\Delta i_H = - \frac{1}{\omega} \left[ \pi Ri_H + \int_0^{\vartheta_1} u'_C d\vartheta + \int_{\vartheta_1}^\pi u''_C d\vartheta \right] \quad (42)$$

или, используя равенство (25),

$$L\Delta i_H = - \frac{1}{\omega} \left[ \frac{\pi \beta P}{\alpha} + \int_0^{\vartheta_1} u'_C d\vartheta + \int_{\vartheta_1}^\pi u''_C d\vartheta \right].$$

Коэффициент форсировки можно определить по следующей формуле:

$$k = \frac{\pi Ri_H + \int_0^{\vartheta_1} u'_C d\vartheta + \int_{\vartheta_1}^\pi u''_C d\vartheta}{\pi Ri_H}. \quad (43)$$

Ниже будет показано, что  $k$  не может уменьшаться со спадом тока. Здесь только отметим, что  $\int_0^\pi u_C d\vartheta$  монотонно стремится к нулю вместе с  $i_H$  и, следовательно, в качестве первого приближения можно считать, что коэффициент форсировки остается

постоянным в течение всего времени разряда индуктивности.

Рассчитаем форсировку при отключении магнитного усилителя для нескольких значений  $\beta$ . Для контроля выполним расчет также для случая  $\beta = 0$ , проведя его непосредственно и с применением выведенных формул. При  $\beta = 0$  второй интеграл в выражении (42) превращается в  $-\int_{\vartheta_1}^\pi \sin \vartheta d\vartheta$ ; кроме того, из уравнения (29) следует, что

$$\int_{\vartheta_1}^{\vartheta_1} u'_C d\vartheta = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_1} \sin \vartheta d\vartheta$$

и, следовательно, при  $\beta = 0$

$$\int_0^{\vartheta_1} u'_C d\vartheta + \int_{\vartheta_1}^\pi u''_C d\vartheta = 0. \quad (44)$$

Таким образом, непосредственный расчет показывает, что форсировка в данном случае отсутствует (равенство  $\int_0^\pi u_C d\vartheta = 0$  сохраняется в течение всего процесса спада тока).

В общем виде значения  $\int_0^{\vartheta_1} u'_C d\vartheta$  и  $\int_{\vartheta_1}^\pi u''_C d\vartheta$  равны:

$$\int_0^{\vartheta_1} u'_C d\vartheta = \frac{1}{2} P \vartheta_1^2; \quad (45)$$

$$\int_{\vartheta_1}^\pi u''_C d\vartheta = \beta A' \left( 1 - e^{-\frac{\pi-\vartheta_1}{P}} \right) - P [1 + \cos \vartheta_1 - \beta \sin \vartheta_1 - \beta (\pi - \vartheta_1)]. \quad (46)$$

Если использовать принятые допущения ( $\cos \vartheta_1 \ll 1$ ,  $e^{-\frac{\pi-\vartheta_1}{P}} \approx 0$ ), то интегралы от  $u'_C$  и от  $u''_C$  приводятся к следующему виду:

$$\int_0^{\vartheta_1} u'_C d\vartheta = \frac{P}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right)^2 = \frac{P}{2} \left( \frac{\pi^2}{4} - \pi \varphi + \varphi^2 \right); \quad (47)$$

$$\int_{\vartheta_1}^\pi u''_C d\vartheta = P [\beta \pi - 1 + 2\beta - \beta^2 - (1 + \beta^2) \varphi - \beta \varphi^2]. \quad (48)$$

Из уравнения (33) находим значение  $\varphi$  для  $\beta = 0$ . Подставив это значение в выражения (47) и (48), получим:

$$\int_0^{\vartheta_1} u'_C d\vartheta = 1,093;$$

$$\int_{\vartheta_1}^\pi u''_C d\vartheta = -1,092.$$

Следовательно,

$$\int_0^{\vartheta_1} u'_C d\vartheta + \int_{\vartheta_1}^\pi u''_C d\vartheta \approx 0, \quad (49)$$

что подтверждает правильность произведенных расчетов.

Результаты вычислений эффективной форсировки для различных значений  $\beta$ , а также сравнительные результаты для бесконечно большой емкости приведены в табл. 2.

Таблица 2

$\beta$	$P$	$\alpha$	$\varphi$	$\int u'_C d\theta$	$\int u''_C d\theta$	$\left( \frac{\pi \beta P}{\alpha} \right)$	$k$ ( $C_{\min}$ )	$\frac{1+\alpha}{k'} \cdot \frac{k}{k}$ ( $C_{\infty}$ )
0,10	0,990	0,1835	0,0859	1,092	-0,577	1,695	1,30	1,18
0,15	0,978	0,297	0,0839	1,081	-0,337	1,545	1,48	1,30
0,20	0,9615	0,433	0,0738	1,080	-0,086	1,396	1,71	1,43
0,25	0,940	0,5875	0,0660	1,065	0,151	1,258	1,97	1,59
0,30	0,916	0,760	0,0545	1,051	0,359	1,138	2,24	1,76
0,35	0,830	0,960	0,0438	1,038	0,558	1,021	2,56	1,96

Как видно из полученных результатов, при обычных значениях  $\beta$ , равных примерно 0,2—0,3, время переходного процесса при отключении магнитного усилителя сокращается примерно в 2 раза. Остается показать, что такое значение форсировки сохраняется на весь период гашения.

Непосредственное вычисление форсировки для произвольного значения тока приводит к чрезвычайно громоздким выражениям, не представляющим практического интереса ввиду их сложности. Это объясняется тем, что при изменении тока меняются начальные условия (напряжение на конденсаторе перестает быть равным нулю в начале и конце полупериода) и выведенные выражения не могут быть использованы. Покажем поэтому качественно, что форсировка не может уменьшаться при спаде тока (фактически увеличивается). Косвенно это подтверждается результатами, полученными для случая большой емкости, где форсировка несколько растет с уменьшением тока, стремясь к пределу  $\frac{R+r}{R} = 1 + \alpha$ .

Рассмотрим физическую сущность процесса для разобранного случая с малой емкостью. Как было показано выше [уравнение (44)], при  $\omega r C$ , стремящемся к нулю, сумма интегралов  $\int u'_C d\theta$  и  $\int u''_C d\theta$  также стремится к нулю. Форсировка фактически обеспечивается именно наличием заряда на конденсаторе, причем как это следует из формулы (46), она определяется, во-первых, экспоненциальным разрядом, а во-вторых, сдвигом фазы по отношению к напряжению питания. И тот и другой процессы определяются полностью приведенной постоянной времени  $\omega r C$ . При уменьшении тока нагрузки угол, при котором происходит открывание магнитного усилителя, увеличивается и, следовательно, длительность цикла разряда емкости уменьшается. Постоянная же времени разряда (и сдвиг фазы) остается прежней. Это должно привести к тому, что относительное значение второго интеграла  $\int u''_C d\theta$  будет увеличиваться с уменьшением тока, а форсировка расти.

Перейдем к рассмотрению последней части задачи. Определим минимальную величину индуктивности, при которой применение указанной схемы является целесообразным. Это будет такое значение индуктивности, при котором разряд конденса-

тора закончится за один полупериод. Так как эти результаты не будут критическими, то для упрощения расчетов сделаем следующие допущения.

Примем, что для расчетного значения емкости напряжение в начале и конце полупериода по-прежнему равно нулю и, учитывая, что амплитуда тока нагрузки достигает максимального значения для угла, лежащего между  $-\frac{\pi}{2}$  и нулем, и минимального — для угла, расположенного в интервале от нуля до  $\frac{\pi}{2}$ , будем считать, что при  $\theta = 0$  ток равен  $i_h = \frac{\beta P}{r}$ .

Анализируя результаты, приведенные в табл. 2, заметим, что для  $\beta = 0,15 \div 0,30$  абсолютное значение интеграла  $\int u''_C d\theta$  мало по сравнению с суммой двух интегралов  $\int u'_C d\theta$  и  $R \int i_h d\theta$ .

Предполагая, что затухание тока завершится за один полупериод, и пренебрегая величиной интеграла  $\int u''_C d\theta$ , придем к выводу, что открывание магнитного усилителя должно произойти в момент, когда ток в контуре равен нулю, т. е. через четверть периода собственной частоты колебаний после начала переходного процесса.

Используя уравнение (29) и допуская в качестве первого приближения, что величиной затухания в течение четверти периода можно пренебречь, т. е. что  $i_h(t)$  можно записать в виде  $i_h \cos \omega_0 t$ , и, подставляя вместо  $i_h(0)$  его значение, получим:

$$\begin{aligned} t_1 = \frac{\theta_1}{\omega} & \quad t_1 = \frac{\varphi}{\omega_0} \\ \int_0^{\theta_1} \sin \omega t dt + P \frac{\omega}{\omega_0} \int_0^{\varphi} \sin \omega_0 t dt &= \\ t = \frac{\pi}{\omega} & \\ = \int_0^{\pi} \sin \omega t dt, \end{aligned} \quad (50)$$

где  $\theta_1 \omega_0 = \varphi \omega$ .

Проинтегрировав выражение (50) и подставив значения  $\theta_1 = \frac{\omega}{\omega_0} \varphi$  и  $\cos \varphi = 0$ , найдем, что

$$P \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - \cos \frac{\omega}{\omega_0} \varphi = 1. \quad (51)$$

Так как значение  $P$  близко к единице, то решение этого уравнения будет иметь вид:

$$\frac{\omega}{\omega_0} \approx 1. \quad (52)$$

В самом деле, заменив  $\cos \frac{\omega}{\omega_0} \varphi$  на  $\sin \psi$ , где  $\psi = \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\omega}{\omega_0} \varphi \right)$ , а  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , и приняв, что  $\sin \psi \approx \psi$ , после подстановки в формулу (51) получим:

$$P \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{\pi}{2} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) - \left( \frac{\pi}{2} + 1 \right) = 0. \quad (53)$$

Решив это уравнение, находим окончательно:

$$\frac{\omega}{\omega_0} \approx 1 + \frac{2\beta^2}{\pi + 4}. \quad (54)$$

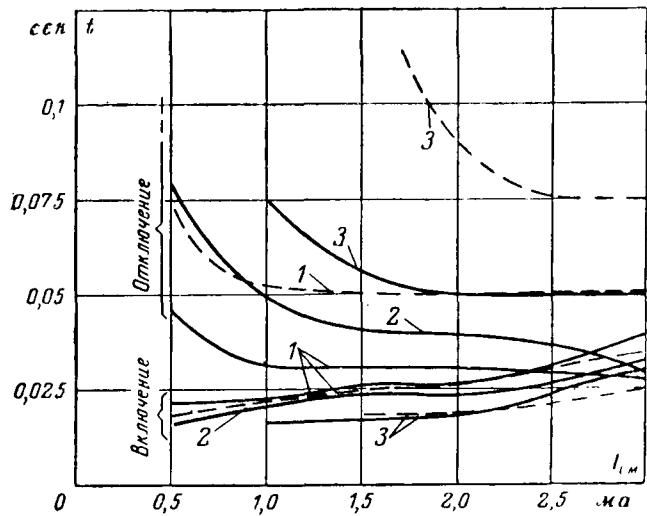


Рис. 2. Время срабатывания магнитного усилителя в функции тока смещения при постоянном входном сигнале.  
— мостиковая схема; — двухполупериодная схема.  
1 —  $U=190$  в; 2 —  $U=220$  в; 3 —  $U=240$  в.

Как видно из полученного результата, для всех реальных величин  $\beta$  отношение  $\frac{\omega}{\omega_0}$  практически равно единице.

Приняв  $\omega = \omega_0$ , найдем соответствующее этой частоте значение индуктивности нагрузки. Собственная частота колебательного контура будет равна:

$$\omega_0 = j \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{1}{LC}}, \quad (55)$$

а величина затухания составит

$$e^{-\alpha t} = e^{-\frac{R}{2L}t}. \quad (56)$$

Заменив в выражении (55)  $C$  на  $\frac{\beta}{\omega r}$  и  $R$  на  $\frac{r}{\alpha}$

и решив его относительно  $\frac{r}{L}$ , получим:

$$\frac{r}{L} = 2\alpha\omega \left[ \frac{\alpha}{\beta} - \sqrt{\left( \frac{\alpha}{\beta} \right)^2 - 1} \right]. \quad (57)$$

Раскрыв подкоренное выражение и пренебрегая членами высших порядков, найдем, что

$$\frac{r}{L} \approx \beta\omega. \quad (58)$$

Фактически с учетом затухания в контуре минимальное расчетное значение индуктивности несколько увеличивается, но так как оно не является критическим, будем считать, что по формуле (58) определяется окончательное значение  $L_{\min}$

$$L_{\min} = \frac{r}{\beta\omega} = \frac{\alpha R}{\beta\omega}. \quad (59)$$

Обратим внимание на то, что частота среза контура  $LRC$ , рассматриваемого как фильтр, равна:

$$\omega_{cp} = \frac{1}{VLC} = \sqrt{\frac{\beta\omega \cdot \omega r}{r \cdot \beta}} = \omega, \quad (60)$$

что при частоте пульсации в нагрузке  $2\omega$  обеспечивает значительное сглаживание тока.

Затухание тока в нагрузке происходит, как было показано выше, в течение первого полупериода

после отключения магнитного усилителя. При обычной схеме спад тока при этих же параметрах проходит за 2—3 полупериода.

При индуктивности, много меньшей  $L_{\min}$ , это выигрыш исчезает, так как в любом случае переходный процесс оканчивается практически в первом же полупериоде.

Все проведенные выше расчеты выполнены для случая нормального возбуждения магнитного усилителя. Совершенно очевидно, что при его перевозбуждении длительность переходного процесса увеличится, а при недовозбуждении уменьшится.

На рис. 2 приведены характеристики магнитного усилителя, имеющие следующие данные.

Сердечник усилителя собран из П-образного пермаллоя марки 79НМА. Сечение сердечника  $7,5 \times 13 \text{ mm}^2$ . Число витков рабочей обмотки и обмотки управления соответственно равны 5 000, а обмотки смещения — 1 500 витков. Сопротивление рабочей обмотки  $r = 240 \text{ ом}$ . Нагрузка — реле МКУ-48 ( $24 \text{ в}$ ,  $R = 320 \text{ ом}$ );  $C = 4 \text{ мкФ}$ . Частота — 50 гц.

Характеристики  $t$  срабатывания в функции тока смещения сняты для трех напряжений питания 45, 52 и 57 в, что соответствует напряжениям сети 190, 220 и 240 в. Нормальное возбуждение магнитного усилителя обеспечивается при напряжении сети 190 в.

Ток управления изменялся скачком от нуля до 1 ма при включении и от 1 ма до нуля при отключении усилителя. Наличие площадки на характеристике для средних значений тока смещения свидетельствует об отсутствии запаздывания, превышающего половину периода.

Как видно из полученных результатов, с учетом запаздывания собственно магнитного усилителя на полупериод выигрыш в быстродействии составил приnomинальном возбуждении величину порядка двух, что соответствует ожидаемым результатам.

**Выводы.** Применение схемы со средней точкой и шунтирующей емкостью рационально во всех случаях, когда постоянная времени нагрузки  $\frac{L}{R}$  превышает 0,5—1 период частоты питания.

При больших значениях постоянной времени нагрузки целесообразно выбирать величину шунтирующей емкости несколько выше критической [примерно  $(1,5 \div 2) C_{\min}$ ], что гарантирует отсутствие индуктивного режима, не снижая быстродействия усилителя при его отключении.

При малых значениях  $\frac{L}{R}$ , когда увеличение емкости нежелательно, оптимальное ее значение должно уточняться экспериментально, так как приведенные выше расчеты основаны на ряде упрощающих допущений, а применение емкости, меньшей критической, приводит к возникновению индуктивного режима с резким ухудшением характеристик магнитного усилителя.

#### Литература

1. Липман Р. А. и Негневицкий И. Б., Быстродействующие магнитные и магнитно-полупроводниковые усилители, Госэнергоиздат, 1960.

2. Сторм Г. Ф., Магнитные усилители, пер. с англ., Изд. иностранной литературы, 1957.

[2.11.1963]

# Определение пусковых характеристик синхронных двигателей

Б. И. КИРКИН

Московский энергетический институт

и Л. С. ЛИНДОРФ

Всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики

Синхронные электродвигатели вследствие ряда преимуществ перед асинхронными находят все более широкое распространение для привода различных промышленных механизмов. В связи с этим целесообразно проанализировать механическую характеристику синхронного двигателя в асинхронном режиме, на основании которой можно судить о величине максимального асинхронного момента, изменении электромагнитного момента в зависимости от различных сопротивлений, вводимых в цепь обмотки возбуждения и т. п.

При помощи указанной механической характеристики представляется возможным установить соответствие параметров двигателя техническим условиям и каталожным данным в части удовлетворения допусков на начальный и минимальный асинхронные моменты и на момент при скольжении, равном 5% (входной момент), а также установить длительность и возможность пуска двигателя различных механизмов и допустимость самозапуска по условиям его входления в синхронизм.

При проведении сопоставления расчетных и опытных характеристик следует иметь в виду, что расчетные характеристики и данные моментов, приводимые в каталогах, соответствуют «статическим» характеристикам, т. е. таким характеристикам, при построении которых предполагают, что в данной точке скорость вращения неизменна. В действительных условиях быстрого пуска реальная характеристика, особенно в зоне малых скольжений, может значительно отличаться от статической.

Построение пусковых характеристик синхронных двигателей по опытным данным неходит широкого распространения вследствие известных трудностей, связанных с экспериментальным определением всех необходимых параметров.

Нахождение опытным путем полной пусковой характеристики синхронного двигателя представляет трудности, аналогичные тем, которые имеют место при определении аналогичной характеристики асинхронного двигателя. Здесь характеристики также зависят от подводимого напряжения, скорости пуска (соотношения времени протекания электромагнитного переходного процесса и длительности пуска) и нагрева машины. Кроме того, отсутствует достаточно надежная и удобная аппаратура для измерения вращающего момента во всем диапазоне изменения скорости двигателя.

Поэтому в настоящее время изыскиваются методы, которые позволили бы достаточно просто и точно определять пусковые характеристики синхронных двигателей. Преимущество при прочих равных условиях следует отдавать таким методам, которые допускают определение характеристик при неподвижном состоянии машины.

Сейчас существуют методы определения пусковой характеристики синхронного двигателя как при его вращении, так и в неподвижном состоянии.

К первым относят методы торможения, измерения ускорения и мощности. Сюда может быть отнесен косвенный метод определения моментной характеристики по параметрам  $x=f(s)$  и  $r=f(s)$ .

Ко вторым относят методы затухания постоянного тока в обмотке статора (или ротора) и питания обмотки статора (или ротора) от источника переменной частоты.

В обоих методах вычисляют соответствующие параметры при различных частотах, характеризующих пусковую характеристику, на основании которых вычисляется сама характеристика.

Ниже приводится краткий анализ, область применения и оценка приведенных выше методов и подробно рассматривается метод питания обмотки статора неподвижной машины от источника переменной частоты.

**Метод торможения** позволяет определять пусковые характеристики двигателя во всем диапазоне скольжений. Существует ряд схем [Л. 1], при помощи которых осуществляют торможение двигателя, непосредственно измеряя при этом момент на валу. Статический электромагнитный момент для каждого данного скольжения определяют из опыта непосредственно.

Основными недостатками этого метода определения пусковой характеристики являются сложность схемы (мощность тормозных машин должна быть в 2 раза и более выше мощности используемых двигателей) и невозможность использования его в условиях эксплуатации. Кроме того, опыт проводится при больших токах в обмотках статора и ротора, в связи с чем необходимо принимать меры по уменьшению нагрева двигателя (периодическое отключение).

В целом этот метод может быть применен в качестве эталонного на стенде завода или института для сравнительно небольших машин.

**Метод измерения ускорения** для определения пусковой характеристики имеет наиболее широкое распространение и основан на пропорциональности ускорения двигателя при пуске и избыточного электромагнитного момента при неизменном известном маховом моменте [Л. 1 и 2]. Определение пусковой характеристики в этом случае может быть произведено непосредственно при помощи различных устройств, реагирующих на изменение ускорения, либо на основании графического способа вычисления ускорения по кривой изменения скорости вращения двигателя.

Основными недостатками данного метода являются: зависимость получаемой характеристики от скорости пуска, если постоянная времени ускорения

соизмерима с постоянными временем протекания электромагнитных процессов, трудность в определении механической характеристики при скольжении, меньшем 10%, трудности с тарированием измерительной аппаратуры. Чтобы получить характеристику в зоне скольжения, равной 10—5%, приходится проводить дополнительные эксперименты при различных нагрузках двигателя без возбуждения. Весьма желательно при этом для питания испытуемой машины иметь источник регулируемого напряжения.

Если при определении механической характеристики используется график скорости, то «провалы» в кривой момента, которые могут иметь место при малых скольжениях, а также при полусинхронной скорости вращения для двигателей с недостаточно мощной пусковой обмоткой, выявить фактически не удается.

Для получения «статической» пусковой характеристики методом определения ускорения необходимо принимать меры к тому, чтобы постоянная времени изменения электромагнитного процесса в машине была бы значительно меньше постоянной времени ускорения. В работах Л. Г. Мамиконянца [Л. 3] показано, что различие в характеристиках, снятых динамическим и статическим способами, особенно велико в зоне малых скольжений, т. е. при входе двигателя в синхронизм. В зависимости от соотношения постоянных времени контура ротора машины и ускорения разница между моментами, определенными динамическим и статическим путем, может достигать 30% и более, причем момент, найденный динамическим способом при скольжениях, меньших 5%, оказывается большим.

**Метод измерения мощности при пуске** для определения пусковой характеристики [Л. 4] получает все большее распространение в связи с применением гальванометров или соответствующих преобразователей для измерения мощности в трехфазной цепи. Этому методу присущи практические те же недостатки, какие имеет способ измерения ускорения. Кроме того, при подсчете электромагнитного момента возникает дополнительная погрешность, вызванная неточным учетом потерь в статоре.

**Косвенный метод определения по средним асинхронным реактивным и активным сопротивлениям**, вычисленным при различных скольжениях, иногда применяют для крупных двигателей. К обмотке статора при различных скоростях вращения ротора в режиме генератора (привод от постоянного источника или на выбеге) подводится питание от источника пониженного напряжения; при этом определяют  $x(s)$  и  $r(s)$  и по ним рассчитывают пусковую характеристику двигателя.

Основным недостатком этого метода является неточное определение параметров, вызванное необходимостью применения при измерениях низкого напряжения. Параметры при этом определяются в ненасыщенном состоянии машины. Кроме того, при наличии остаточного напряжения, могут быть искажены результаты измерения. Использование полученных таким способом параметров для машин, в которых сильно сказывается насыщение,

приводит к тому, что расчетные значения момента и пускового тока оказываются меньше действительных.

Если опыт производят в условиях эксплуатации на выбеге двигателя, то обычно получить параметры в области малых скольжений не удается.

**Метод затухания постоянного тока в обмотке статора неподвижной машины** [Л. 5] заключается в том, что в обмотку статора (можно и ротора) подается постоянный ток, после чего обмотка замыкается накоротко. По осциллограмме затухания тока определяют экспоненциальные составляющие тока и соответствующим расчетом — частотные характеристики изменения среднего тока статора и параметров от частоты. Если ротор сориентирован по осям  $d$  и  $q$ , то сразу же получают соответствующие параметры по продольной и поперечной осям.

Этот метод определения пусковой характеристики синхронного двигателя уже достаточно подробно рассмотрен [Л. 6] и здесь не приводится. Указанному методу присущи некоторые сложности в обработке экспериментального материала и трудности в получении насыщенных характеристик.

**Метод питания обмотки статора неподвижной машины от источника переменной частоты** [Л. 7] заключается в том, что в обмотку статора (предпочтительно) неподвижной машины, сориентированной по осям  $d$  и  $q$ , подается питание от источника переменного синусоидального тока, частоту которого можно изменять в пределах практически от нуля до 50 гц. На каждой ступени частоты измеряют подводимые напряжение, ток, угол сдвига между ними и их частоту. По результатам измерений определяют реактивные и активные сопротивления на каждой ступени частоты, по которым вычисляют пусковую характеристику машины по оси  $d$  или  $q$ . Взяв полусумму полученных моментов, определяют среднюю асинхронную характеристику (см. приложение). На основании этого метода можно специально исследовать зону малых скольжений, в которой ожидается «провал» асинхронного момента.

Применение указанного способа в условиях заводских стендов, на которых имеются вспомогательные генераторы переменной частоты, не представляет больших трудностей. В условиях эксплуатации, где источников переменной частоты нет, приходится ограничивать измерения областью частот, соответствующих скольжениям примерно 10% и ниже, и частотой 50 гц. Если при этом использовать пусковую характеристику, вычисленную при помощи графиков мощности или ускорения в области сравнительно больших скольжений, то можно получить уточненную пусковую характеристику двигателя. Здесь следует отметить, что наиболее важная область характеристики в части оценки втягивания двигателя в синхронизм и его выбора определяется при помощи рассматриваемого метода.

К недостаткам этого метода следует отнести необходимость в источнике низкой частоты и соответствующей измерительной аппаратуре.

Характеристики в области скольжения 10% и ниже могут быть исследованы, например, при помощи отдельно стоящего агрегата возбуждения и генератора низких частот, который подключается

к обмотке возбуждения возбудителя. Если мощность генератора низкой частоты мала, то в качестве промежуточного усилителя может быть использован электромашинный усилитель. Как показал опыт, обычные возбудители достаточно устойчиво, без заметного искрения, могут работать при частоте до 5 гц, а в некоторых случаях и выше.

Оба статических метода определения частотных характеристик электрических машин зависят от состояния их магнитной цепи, поэтому результаты измерений при малых токах могут быть случайными.

Для получения однозначных результатов измерений следует либо проводить измерения при достаточно больших токах, либо принимать меры для проведения экспериментов на линейной части кривой намагничивания. Одним из способов осуществления последнего может быть подмагничивание машины постоянным током.

Влияние подмагничивания исследовалось нами на нескольких синхронных двигателях применительно к методу питания обмотки статора от источника напряжения переменной частоты. Исследования проводились как по схеме питания постоянным током обмотки ротора, так и одной фазы статора, отсоединеной от двух других, по которым пропускался переменный ток. Ротор при этом располагался как по продольной, так и по поперечной осям.

Результаты исследования показали, что наиболее простой и эффективной схемой явилась такая, по которой ток подмагничивания подается в обмотку ротора. Сопротивления двигателя достигают установленного значения при увеличении тока подмагничивания до тока возбуждения, соответствующего возбуждению холостого хода при номинальном напряжении двигателя. При токах подмагничивания, значительно больших токов возбуждения холостого хода, будет иметь место перенасыщение магнитной системы и искажение получаемых параметров.

В качестве примера на рис. 1 приведена зависимость сопротивлений синхронного двигателя СТМ-4000-2 от переменного тока при различных токах подмагничивания. Как следует из изображенных на рисунке зависимостей, при токе подмагничивания, равном току возбуждения холостого хода при номинальном напряжении (105 а), значения входных сопротивлений двигателя не изменяются при изменении тока двигателя в пределах от 0,14 до 0,37 от номинального.

Таким образом, для проведения опытов по определению асинхронной характеристики можно пользоваться источником переменной частоты, который бы обеспечивал ток не более 0,1 от номинального при одновременном подмагничивании машины. Этим достигается однозначность получаемых результатов.

Как известно, параметры двигателя в зависимости от его конструктивных особенностей (толщины спинки активной стали), а также от номинальной скорости вращения в большей или меньшей степени зависят от насыщения. Различают насыщение по основному магнитному пути потока и насыщение, обусловленное полями рассеяния. Подмагничивание машины постоянным током при статических

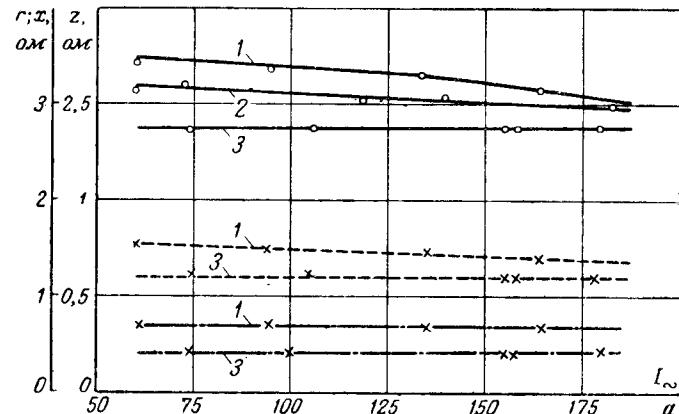
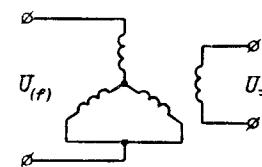


Рис. 1. Влияние подмагничивания на величину входных сопротивлений двигателя СТМ-4000-2.

— z; - - x; - - - r; 1—I<sub>0</sub>=0; 2—I<sub>0</sub>=50 а; 3—I<sub>0</sub>=105 а.

опытах позволяет приблизиться к насыщению ее по основному магнитному пути потока. Учет насыщения, вызванного полями рассеяния, может быть произведен косвенным способом (из опыта пуска).

С насыщением изменяются не только реактивные сопротивления, но и активные (рис. 1). При этом отношение насыщенных значений к ненасыщенным у реактивных сопротивлений может отличаться от соответствующих отношений активных сопротивлений. Для примера на рис. 2 приведены параметры синхронного двигателя МС-321-6/8, определенные

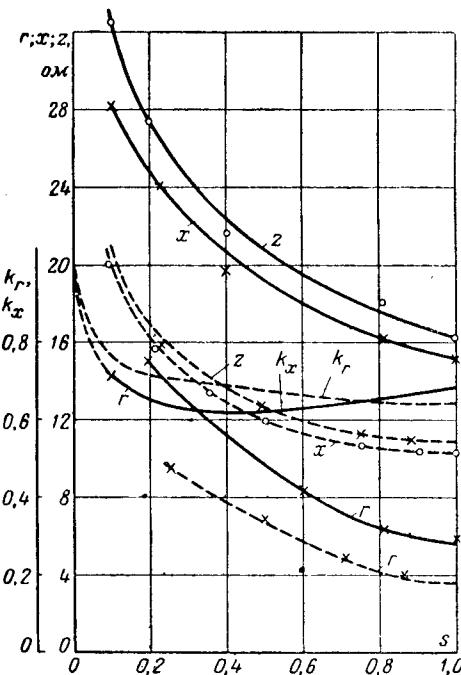


Рис. 2. Зависимость параметров синхронного двигателя МС-321-6/8 от частоты.

— ненасыщенные значения (из опыта на неподвижном двигателе);  
— насыщенные значения (из опыта пуска).

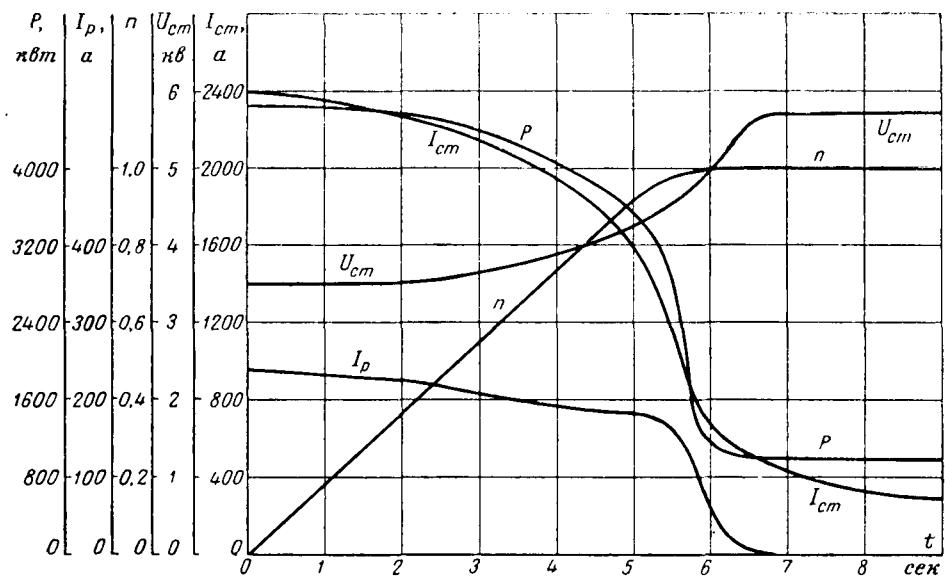


Рис. 3. Пусковые характеристики двигателя СТМ-4000-2.

при пуске двигателя и методом питания обмотки статора от источника напряжения переменной частоты (с подмагничиванием). Здесь «коэффициенты насыщения» для активных и реактивных сопротивлений при неподвижной машине примерно одинаковы (0,64 и 0,68 соответственно). По мере уменьшения скольжения эти коэффициенты длительное время поддерживаются на неизменном уровне и при  $s < 0,1$  приближаются к единице.

Таким образом, в тех случаях, когда для точно го учета насыщения не может быть проведен опыт пуска, учет насыщения при изменении скольжения в пределах от  $s = 1$  до  $s \approx 0,2$  представляется возможным осуществлять с помощью «коэффициентов

$$k_r = \frac{r_{\text{нас}}}{r_{\text{ненас}}} \quad \text{и} \quad k_x = \frac{x_{\text{нас}}}{x_{\text{ненас}}}$$

насыщения», вычисленных при неподвижной машине. При этом ненасыщенное значение получают при низком напряжении (с подмагничиванием), а насыщенное значение — в начальный момент пуска или при заторможенном роторе и напряжении, не меньшем 0,6 номинального.

Для сопоставления механических характеристик, определенных методом подачи напряжения переменной частоты в обмотку неподвижной машины, с другими общепринятыми экспериментальными методами были произведены исследования двух синхронных двигателей: с неявно выраженным полюсами типа СТМ-4000-2 (4000 квт, 6 кв, 428 а,  $\cos \phi = 0,9$ , 3000 об/мин) и с явно выраженным полюсами типа МС-321-6/8 (390 квт, 6 кв, 50,5 а,  $\cos \phi = 0,9$ , 750 об/мин).

Испытания двигателя СТМ-4000-2 проводились на стенде Лысьвенского турбогенераторного завода и в условиях эксплуатации на одном из промышленных объектов, где он используется в качестве привода компрессора. Пуски во время испытаний проводились при напряжении, равном примерно 0,6 от номинального значения, через реактор (рис. 3).

Испытания двигателя МС-321-6/8 проводились на стенде Московского энергетического института,

где он используется в качестве привода генератора постоянного тока. Пуск двигателя во время испытаний проводился непосредственно от сети без токоограничивающих устройств.

Во время испытаний определение механических характеристик проводилось графическим методом по зафиксированным мощности и ускорениям при пуске с их уточнением в области малых скольжений по асинхронному режиму и методом питания обмотки статора неподвижной машины от источника переменной частоты. Маховой момент агрегата определялся по времени выбега.

Для регистрации напряжения тока, мощности и скорости вращения двигателя применялись осциллограф, преобразователи мощности в трехфазной цепи

с использованием эффекта Холла и униполярна: тахометрическая машина. Кроме этого на осциллограмме записывался ток в обмотке ротора при пуске; по частоте этого тока затем проводилось дублирование измерения скорости вращения по времени.

На двигателе СТМ-4000-2, кроме вышеупомянутых опытов, проводилось также определение частотной характеристики при работе его в режиме генератора с различными скоростями вращения. В обмотку статора подавалось напряжение 380 в (50 гц от трехфазного источника и измерялись ток, напряжение, мощность и скорость вращения.

Результаты измерений и подсчетов приведены на рис. 4, на котором также нанесены результаты измерения сопротивлений обмотки при неподвижном состоянии двигателя и различных частотах подводимого напряжения. Как видно из графиков, изображенных на этом рисунке, результаты экспериментов достаточно хорошо совпадают в области скольжений, превышающих 0,4. При малых скольжениях, превышающих 0,4. При малых скольжениях, превышающих 0,4.

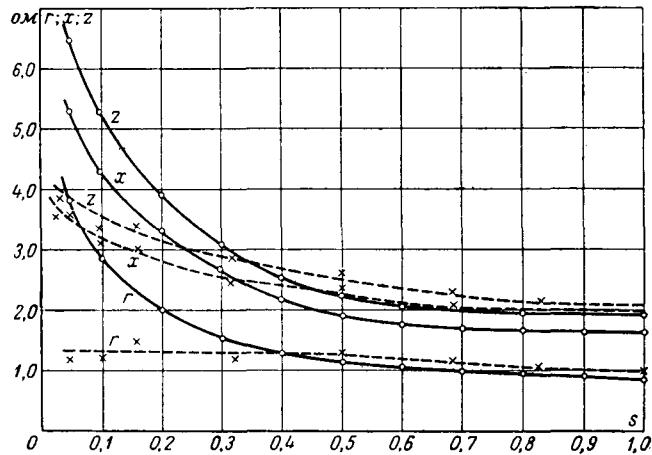


Рис. 4. Частотные характеристики синхронного двигателя СТМ-4000-2, полученные на вращающейся (—) и неподвижной (---) машине.

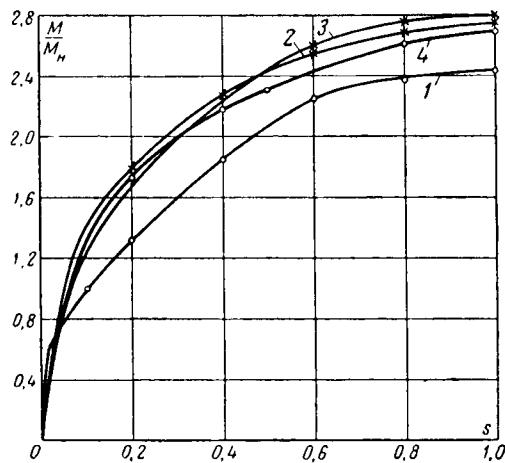


Рис. 5. Пусковые характеристики синхронного двигателя СТМ-4000-2.

1 — по методу гармонических колебаний (с подмагничиванием); 2 — по графику мощности; 3 — по ускорению; 4 — по методу гармонических колебаний с учетом насыщения.

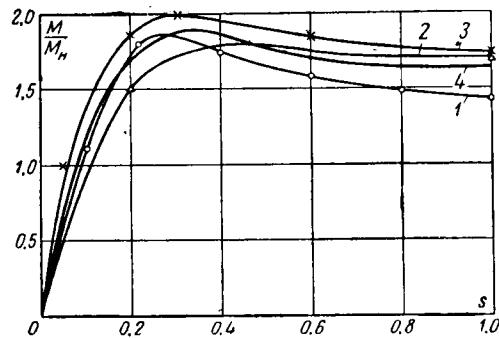


Рис. 6. Пусковые характеристики синхронного двигателя МС-321-6/8 390 квт. Обозначения те же, что и на рис. 5.

жениях данные, полученные из опыта вращения ротора с разными скоростями, получались слишком заниженными. Погрешности возникают из-за трудности поддержания неизменной скорости вращения вследствие возникновения знакопеременных моментов, наличия остаточного напряжения, сложности измерения и обработки переменных величин, зависящих от частоты скольжения. Этот опыт наглядно подтверждает большие погрешности в определении частотной характеристики методом непосредственных измерений на вращающейся машине в области малых (менее 0,3) скольжений.

Механические пусковые характеристики, полученные различными методами, приведены на рис. 5 (для СТМ-4000-2) и на рис. 6 (для МС-321-6/8). В обоих случаях характеристики, полученные частотным методом, хорошо совпадают с характеристиками, полученными по общепризнанным методам.

**Выводы.** Статический метод определения пусковой характеристики синхронного двигателя путем питания обмотки от источника переменной частоты может быть использован для получения всей пусковой характеристики синхронных двигателей или уточнения отдельных ее областей.

При подмагничивании машины постоянным током достигается однозначность получаемых результатов; при этом измерения могут быть проведены при малых токах.

Учет насыщения может быть осуществлен косвенно с использованием «коэффициентов насыщения», полученных из опыта с неподвижным ротором или из опыта пуска.

**Приложение.** Определение асинхронной характеристики из опыта питания обмотки статора в неподвижном состоянии от источника напряжения переменной частоты. При проведении опыта ротор устанавливается первоначально по одной оси (при этом проводятся необходимые измерения при питании обмотки статора от источника напряжения с различными частотами), а потом в другой оси с повторением данных измерений. По результатам измерений вычисляются соответствующие параметры и изображаются их графики. Механическая характеристика строится в соответствии с графиком по выбранным частотам. Все опыты должны проводиться при подмагничивании машины путем подачи постоянного тока в обмотку ротора или в одну фазу статора, к которой не подводится питание от источника переменной частоты.

Результаты осциллографирования подводимого напряжения к обмотке статора, тока и времени (50 Гц) приведены на рис. 7 для синхронного двигателя СТМ-4000-2 (6 кв, 4 000 кват, 428 а, 3 000 об/мин). Ротор его был установлен по поперечной оси.

По осциллограмме определяются двойные амплитуды напряжения ( $U_m$ ) и тока ( $I_m$ ) в миллиметрах, протяженность периода ( $l_1$ ) в миллиметрах, сдвиг тока относительно напряжения ( $l_m$ ) как среднее двух измерений  $l_2 = \frac{l' + l''}{2}$  и протяженность одного периода отметчика времени  $l_3$  (для точности измеряется  $l_3'$  для нескольких периодов с последующим пересчетом на один).

Для осциллограммы, изображенной на рис. 7, получено:

$$U_m = 62 \text{ мм}; l_1 = 110 \text{ мм}; l_3 = \frac{110}{12} = 0,17 \text{ мм};$$

$$I_m = 48 \text{ мм}; l_2 = 16,55 \text{ мм}.$$

Масштаб для напряжения равен  $m_U = 2,7 \text{ в/мм}$ , а для тока  $m_I = 4,72 \text{ а/мм}$ . На основании этих данных определяем:

скольжение

$$s = \frac{f_{\text{опт}}}{50} = \frac{f_{\text{отм}} l_3}{50 l_1} = \frac{50 \cdot 9 \cdot 17}{50 \cdot 110} = 0,083,$$

где  $f_{\text{опт}}$  — частота отметчика времени;

угол сдвига между напряжением и током

$$\varphi = \frac{l_2}{l_1} \cdot 360 = \frac{16,55 \cdot 360}{110} = 54,5^\circ;$$

полное сопротивление фазы двигателя

$$z_{\text{неп}} = \frac{U_m}{I_m} \frac{m_U}{m_I} k_{\text{сх}} = 0,49 \text{ ом},$$

где  $k_{\text{сх}}$  — коэффициент схемы, зависящий от соединения обмотки статора.

В случае, если переменный ток подается в две фазы, соединенные между собой параллельно и последовательно с третьей,  $k_{\text{сх}} = \frac{2}{3}$ . В этом случае, если результаты

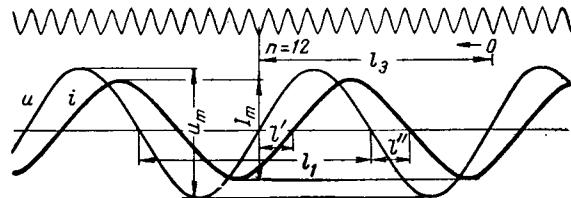


Рис. 7. Осциллограмма тока и напряжения, полученная при определении механической характеристики частотным методом.

желательно иметь сразу же в относительных единицах, целесообразно при определении  $z$  сразу же ввести в знаменатель базисное полное сопротивление, принимаемое равным  $z_b = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n}$ ;

реактивное сопротивление (в данном случае по оси  $q$ )

$$x(s) = \frac{z_{\text{неп}} \sin \varphi}{s} = \frac{0,49 \sin 54,5^\circ}{0,083} = 4,8 \text{ ом};$$

активное сопротивление двигателя (для случая, изображенного на рис. 7, по оси  $q$ )

$$r(s) = \frac{r_{\text{неп}} - r_{\text{ст}}}{s} + r_1 = 3,21 \text{ ом},$$

где  $r_{\text{неп}} = z \cos \varphi = 0,49 \cos 54,5^\circ = 0,29 \text{ ом}$ ;

$r_{\text{ст}}$  — сопротивление фазы обмотки статора при частоте приложенного напряжения; это сопротивление может быть определено при вынутом роторе;

$r_1$  — сопротивление фазы обмотки статора при名义ной частоте.

При проведении расчетов моментов с точностью в пределах 5% вместо  $r_{\text{ст}}$  и  $r_1$  можно принимать сопротивление фазы обмотки статора при постоянном токе. Это особенно справедливо для скольжений, меньших 0,1. Для данной машины  $r_0 = 0,03 \text{ ом}$ . Для уточнения последующих расчетов целесообразно  $x(s)$  и  $r'_{20}$  изобразить в виде графика;

полное входное сопротивление

$$z(s) = \sqrt{x(s)^2 + r(s)^2} = \sqrt{4,8^2 + 3,21^2} = 5,78 \text{ ом};$$

составляющую асинхронного момента по данной оси

$$m = \frac{M}{M_n} = k \frac{r'_2}{z^2(s)} = 9 \frac{3,18}{5,78^2} = 0,86,$$

где

$$k = \frac{U_n^2}{P_n}.$$

Здесь потерями холостого хода пренебрегают, так как погрешность от их неучета не превышает 0,5%;

средний асинхронный момент при данном скольжении

$$m_{\text{ср}} = \frac{m_a + m_q}{2}.$$

Значения среднего момента изображаются в виде графиков.

Из опытов пуска и питания двигателя при неподвижном роторе определяются  $x(s)$  и  $r(s)$ . По данным вычисляются «коэффициенты насыщения» и определяется момент двигателя в насыщенном состоянии. Для приближенного расчета в начальной части пуска до ( $s \approx 0,2$ ) в расчет могут приниматься неизменные значения «коэффициентов насыщения», полученные при опытах на неподвижной машине. При скольжениях, меньших 0,2, «коэффициент насыщения» быстро увеличивается до значения, близкого к единице.

Графики среднего асинхронного момента, подсчитанные для ненасыщенного значения магнитной системы двигателя (кривая 1) и с учетом насыщения (кривая 4), приведены на рис. 5.

### Литература

- Пиотровский Л. М., Васютинский С. Б. и Несговорова Е. Д., Испытание электрических машин. Госэнергоиздат, 1960.
- Нюриберг В., Испытание электрических машин, перев. с нем., Госэнергоиздат, 1959.
- Мамиконян Л. Г., Токи и моменты асинхронных и синхронных машин при изменении скорости их вращения, «Электричество», 1958, № 8.
- Определение допустимости пуска и самозапуска циркуляционного насоса 40 ПРВ-60×2 с развернутыми лопастями. Информационные материалы ВНИИЭ, № 16, Госэнергоиздат, 1957.
- Казовский Е. Я., Переходные процессы в электрических машинах переменного тока, Изд-во АН СССР, 1962.
- Костенко М. П., Сулиов Н. С., Казовский Е. Я. и Микляев М. С., Определение частотных методом пусковых характеристик синхронных двигателей Изв. АН СССР, 1962, № 1.
- Соколов Н. И. и Киркин Б. И., Определение частотных характеристик синхронных машин, «Электричество», 1962, № 1.

[27.1.1964]

УДК 538.551.1 : 621.313.32

## Векторные диаграммы синхронной машины с несимметричной обмоткой статора в несимметричных режимах

Инж. В. М. АЛЯБЬЕВ

Ленинград

**Введение.** В ряде случаев синхронная машина имеет несимметричную обмотку статора и нагружается несимметричными трехфазными токами. Эти случаи могут иметь место при повреждениях обмоток крупных генераторов, вызывающих необходимость выключения части секций обмотки статора, а также при работе некоторых специальных машин, таких как синхронные расщепители фаз, в которых для компенсации несимметрии трехфазного напряжения обмотку статора можно делать несимметричной.

Предложено достаточно большое число векторных диаграмм синхронной машины с симметричной обмоткой статора, но, насколько нам известно, в литературе нет описания построения векторной

диаграммы синхронной машины с несимметричной обмоткой статора, работающей на несимметричную нагрузку.

При построении векторной диаграммы для синхронной машины с симметричной многофазной обмоткой несимметричные токи статора обычно разлагают на симметричные составляющие и реакцию якоря учитывают равными для всех фаз падениями напряжения в синхронных индуктивных сопротивлениях от токов прямой последовательности и в индуктивном сопротивлении обратной последовательности — от токов обратной последовательности<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Костенко М. П., Электрические машины, Специальная часть, Госэнергоиздат, 1949.

При несимметричной обмотке статора, т. е. при различных фазных углах и неодинаковом числе витков в фазах обмотки статора этот метод неприменим.

Предлагаемые в статье способы построения векторных диаграмм можно использовать при нагрузках и обмотках статора с любой несимметрией.

**Векторная диаграмма н. с.** Явнополюсная машина имеет трехфазную несимметричную обмотку статора с неодинаковыми углами  $\alpha_{ab}$ ,  $\alpha_{bc}$ ,  $\alpha_{ca}$  между осями фаз  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (рис. 1) и с неравными эффективными числами витков в фазах  $w_a$ ,  $w_b$ ,  $w_c$ , и по обмотке проходит несимметричный трехфазный ток. Неравные углы между векторами фазных токов  $I_a$ ,  $I_b$  и  $I_c$  обозначим  $\beta_{ba}$ ,  $\beta_{cb}$  и  $\beta_{ac}$ .

Основную волну пульсирующей н. с. каждой фазы разложим на две вращающиеся в противоположные стороны с синхронной скоростью н. с. — прямую и обратную, с амплитудами' для фазы  $a$ , равными:

$$F_{na} = F_{ob\ a} = \frac{2}{\pi} \frac{w_a}{p} I_{ma} = 0,637 \frac{w_a}{p} I_{ma}, \quad (1)$$

где  $I_{ma}$  — амплитуда тока в фазе  $a$ ;  
 $p$  — число пар полюсов.

Амплитуды прямой и обратной н. с. фаз  $b$  и  $c$  выражаются аналогичными формулами.

Построим векторную диаграмму н. с. фазы  $a$  для момента времени, когда ток и н. с. фазы  $a$  максимальны.

Пространственные и временные векторы и оси отложены на всех рисунках. К пространственным относятся: оси фаз, векторы н. с. и потоков; к временным — векторы токов, э. д. с., потоков и напряжений. Таким образом, общими для пространственных и временных диаграмм являются векторы потоков. Совмещение пространственных и временных диаграмм произведем таким образом, чтобы общие векторы потоков совпадли.

Для этого ось фазы  $a$  примем за ось мгновенных значений  $OM$  временной диаграммы, на которую надо проектировать временные векторы для получения мгновенных значений фазных величин. При этом вектор тока  $I_a$  будет совпадать с осью мгновенных значений  $OM=Oa$ . Векторы н. с. и потока реакции якоря фазы  $a$  и их прямые и обратные составляющие  $F_{na}$  и  $F_{ob\ a}$  будут также направлены по оси фазы  $a$  (рис. 1).

Если ток в фазе  $b$  отстает по фазе от тока в фазе  $a$  на угол  $\beta_{ba}$ , то векторы прямой и обратной н. с. фазы  $b$   $F_{nb}$  и  $F_{ob\ b}$  откладываются под тем же углом  $\beta_{ba}$  к оси фазы  $b$  соответственно в отрицательную и положительную стороны. По истечении времени  $t_\beta = \frac{\beta_{ba}}{\omega_c}$ , т. е. в момент, когда ток в фазе  $b$  будет иметь максимальное значение, векторы н. с.  $F_{nb}$  и  $F_{ob\ b}$  будут совпадать с осью фазы  $b$ . Аналогично откладываются векторы прямой и обратной н. с. фазы  $c$   $F_{nc}$ ,  $F_{ob\ c}$ .

Сложив отдельно векторы прямых и обратных н. с. всех фаз, получим прямой  $F_n$  и обратный  $F_{ob}$  — результирующие векторы н. с. всей обмотки, т. е.

$$\bar{F}_n = \bar{F}_{na} + \bar{F}_{nb} + \bar{F}_{nc}; \quad (2)$$

$$\bar{F}_{ob} = \bar{F}_{ob\ a} + \bar{F}_{ob\ b} + \bar{F}_{ob\ c}. \quad (3)$$

В неявнополюсной машине приведенная к обмотке возбуждения прямая н. с. реакции якоря может быть вычислена по формуле

$$F'_n = \frac{\pi^2 \gamma}{8 \sin \gamma} \frac{\pi}{2} F_n, \quad (4)$$

где  $\gamma$  — отношение обмотанной части полюса к полюсному делению.

В явнополюсной синхронной машине прямую н. с.  $F_n$  целесообразно разложить на продольную  $F_{nd}$  и поперечную  $F_{nq}$  составляющие.

Для приведения н. с. распределенной обмотки статора к сосредоточенной обмотке возбуждения явнополюсной машины можно воспользоваться формулами

$$\begin{cases} F'_{nd} = \kappa_{ad} F_{nd}; \\ F'_{nq} = \kappa_{aq} F_{nq}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\kappa_{ad}$ ,  $\kappa_{aq}$  — коэффициенты продольной и поперечной реакций якоря, зависящие от величины воздушного зазора и коэффициента полюсной дуги<sup>1</sup>.

Аналогично могут быть построены векторные диаграммы н. с. для моментов времени, когда токи максимальны в фазах  $b$  и  $c$ . Взаимное положение этих диаграмм определяется углами между векторами фазных токов  $\beta_{ba}$ ,  $\beta_{ca}$ ,  $\beta_{cb}$ .

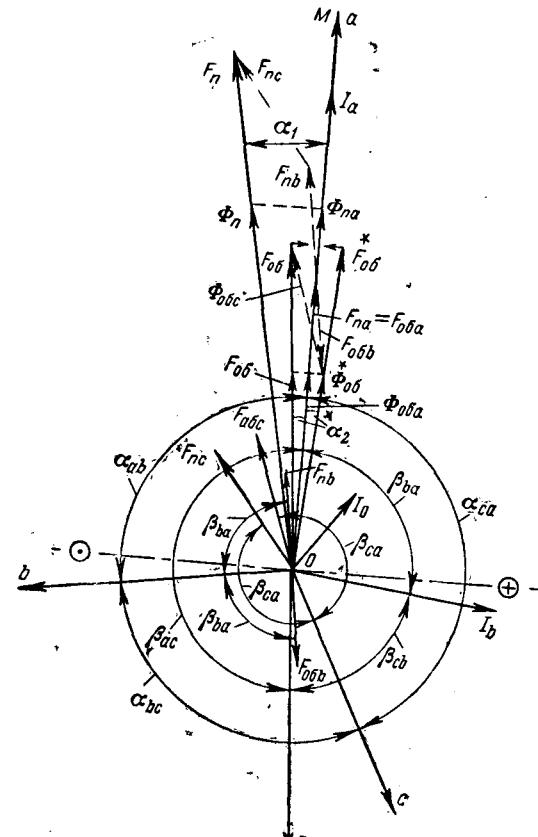


Рис. 1.

**Эквивалентные токи.** Под эквивалентным током фазы  $a$  прямой последовательности  $I_{\text{э1}a}$  будем понимать эффективное значение симметричного трехфазного тока, проходящего по симметричной обмотке с числом витков в каждой фазе, равным  $w_a$ , который создаст н. с., равную прямой н. с.  $F_n$ . Таким образом,  $I_{\text{э1}a}$  определится из равенств:

$$F_n = m \frac{2V^2}{\pi} \frac{w_a}{p} I_{\text{э1}a}, \quad (6)$$

т. е.

$$I_{\text{э1}a} = \frac{\pi p}{2V^2 m w_a} F_n = 1,11 \frac{p}{m w_a} F_n. \quad (7)$$

Аналогично определяется эквивалентный ток фазы  $a$  обратной последовательности:

$$I_{\text{э2}a} = \frac{\pi}{2V^2} \frac{p}{m w_a} F_{\text{об}} \quad (8)$$

и эквивалентные токи фаз  $b$  и  $c$ . Для симметричной обмотки эквивалентные токи равны соответствующим симметричным составляющим, т. е.

$$\bar{I}_{\text{э1}a} = \bar{I}_{1a} \text{ и } \bar{I}_{\text{э2}a} = \bar{I}_{2a}.$$

**Фазы э. д. с., индуцируемых в обмотке статора потоками, созданными н. с.  $F_n$  и  $F_{\text{об}}$ .** Пренебрегая потерями в стали, можно считать пространственные оси магнитных потоков совпадающими с векторами соответствующих н. с. В начальный момент ( $\omega t=0$ ) векторы н. с. и потоков занимают положения, показанные на рис. 1.

При вращении в пространстве прямых н. с.  $F_n$  и потока  $\Phi_n$  в положительном направлении с синхронной скоростью составляющая этого потока по оси  $a$  и, следовательно, мгновенное значение прямого потока, сцепленного с фазой  $a$ , будут равны:

$$\Phi_{na} = \Phi_n \cos(\omega t + \alpha_1). \quad (9)$$

Обратный поток вращается в пространстве с синхронной скоростью в отрицательном направлении. Его составляющая, направленная по оси фазы  $a$ , равна:

$$\Phi_{\text{об}a} = \Phi_{\text{об}} \cos(-\omega t + \alpha_2) = \Phi_{\text{об}} \cos(\omega t - \alpha_2). \quad (10)$$

Так же будет выражаться и составляющая по оси  $a$  потока  $\Phi_{\text{об}}$ , сопряженного с потоком  $\Phi_n$  относительно оси  $a$ .

Мгновенные значения э. д. с., индуцируемых в фазе  $a$  потоками  $\Phi_n$  и  $\Phi_{\text{об}}$ , будут равны:

$$e_{na} = -w \frac{d\Phi_{na}}{dt} = E_{na} \cos\left(\omega t + \alpha_1 - \frac{\pi}{2}\right); \quad (11)$$

$$e_{\text{об}a} = -w \frac{d\Phi_{\text{об}a}}{dt} = E_{\text{об}a} \cos\left(\omega t - \alpha_2 - \frac{\pi}{2}\right), \quad (12)$$

где  $E_{na}$  и  $E_{\text{об}a}$  — амплитуды прямой и обратной э. д. с., равные:

$$E_{na} = \omega w_a \Phi_n, \quad E_{\text{об}a} = \omega w_a \Phi_{\text{об}}. \quad (13)$$

Ток в фазе  $a$  изменяется по уравнению  $i_a = I_m \cos \omega t$ . Поэтому, если от пространственной диаграммы (рис. 1) и времени  $t=0$  перейти к временной (рис. 2) и времени  $t>0$ , то на рис. 2 следует направить к оси мгновенных значений  $OM$  ток  $I_a$  под углом  $\omega t$ , векторы потока  $\Phi_n$  и н. с.  $F_n$

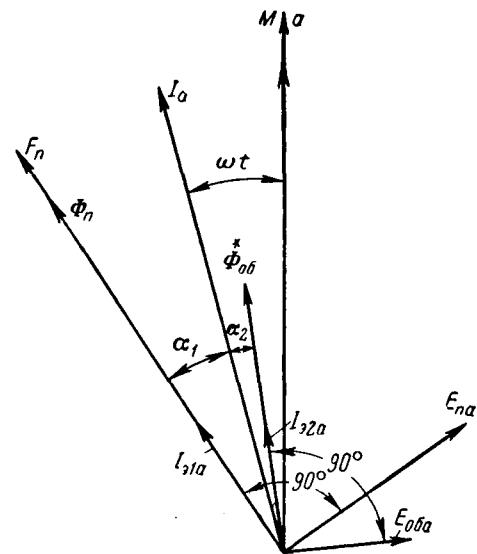


Рис. 2.

под углом  $\omega t + \alpha_1$  и вектор  $\Phi_{\text{об}}$  под углом  $\omega t - \alpha_2$ . Согласно формулам (11) и (12), векторы э. д. с.  $E_{na}$  и  $E_{\text{об}a}$  надо чертить в сторону отставания на угол  $90^\circ$  соответственно от потоков  $\Phi_n$  и  $\Phi_{\text{об}}$ .

На пространственной диаграмме (рис. 1) вектор  $\Phi_{\text{об}}$  вращается в отрицательном направлении, а все векторы на временной диаграмме — в положительном направлении. Поэтому при переходе от пространственной диаграммы к временной вместо вращающегося в отрицательном направлении вектора  $\Phi_{\text{об}}$  надо чертить вектор ему сопряженный  $\Phi_{\text{об}}$ , вращающийся в положительном направлении.

Электродвижущие силы  $E_{na}$  и  $E_{\text{об}a}$ , индуцируемые в фазе  $a$  потоками  $\Phi_n$  и  $\Phi_{\text{об}}$ , можно выразить в виде

$$\begin{aligned} \bar{E}_{na} &= -j x_{da} \bar{I}_{\text{э1}a} = -j(x_{ada} \bar{I}_{\text{э1}a} + x_{sa} \bar{I}_{\text{э1}a}); \\ \bar{E}_{\text{об}a} &= -j x_{2a} \bar{I}_{\text{э2}a}, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\bar{I}_{\text{э1}a}$  и  $\bar{I}_{\text{э2}a}$  — векторы эквивалентных токов, опережающие векторы соответствующих э. д. с.  $\bar{E}_{na}$  и  $\bar{E}_{\text{об}a}$  на  $90^\circ$  и совпадающие по фазе с векторами потоков  $\Phi_n$  и  $\Phi_{\text{об}}$  (рис. 2).

Так как эквивалентные токи  $I_{\text{э1}a}$  и  $I_{\text{э2}a}$ , проходя по симметричной трехфазной обмотке с числом витков во всех фазах, равным  $w_a$ , создают реальные н. с.  $F_n$  и  $F_{\text{об}}$ , то в первом приближении  $x_{ada}$ ,  $x_{sa}$  и  $x_{2a}$  можно приравнять тем же сопротивлениям симметричной трехфазной обмотки с числом витков во всех фазах, равным  $w_a$ . Аналогично может быть подсчитано для фазы  $a$  индуктивное сопротивление нулевой последовательности  $x_{oa}$ . При этом пренебрегается влиянием несимметрии обмоток лишь на те части потоков рассеяния фазы  $a$ , которые созданы взаимной индукцией фаз  $b$  и  $c$ . Это пренебрежение не вызовет большой погрешности, так как величины  $x_s$ ,  $x_2$  и  $x_o$  по сравнению с  $x_{ada}$  относительно невелики. Эти рассуждения можно повторить и для фаз  $b$  и  $c$ .

**Векторная диаграмма напряжений неявнополюсной синхронной машины.** Основные э. д. с. в фазах составят углы  $\alpha_{ab}$ ,  $\alpha_{bc}$  и  $\alpha_{ca}$  и будут прямо пропорциональны эффективным числам витков фаз, т. е.

$$E_a : E_b : E_c = w_a : w_b : w_c.$$

Перенесем векторы токов  $I_a$ ,  $I_0$  и н. с.  $F_n$ ,  $F_{ob}$  с рис. 1 на рис. 3 и проведем векторы  $I_{\vartheta_1 a}$  и  $I_{\vartheta_2 a}$  по направлению векторов н. с. соответственно  $F_n$  и  $F_{ob}$ .

По направлению вектора  $F_n$  отложим вектор  $F'_n$  н. с. обмотки статора, приведенной к обмотке возбуждения. Под углом  $\varphi$  к вектору тока  $I_a$  построим вектор  $U_a$  напряжения фазы  $a$  и от конца его последовательно отложим: параллельно току  $\bar{I}_a$  — вектор  $r_a I_a$ , перпендикулярно току  $\bar{I}_{\vartheta_2 a}$  — вектор  $x_{2a} I_{\vartheta_2 a}$ , перпендикулярно току  $\bar{I}_0$  — вектор  $x_{0a} I_0$  и перпендикулярно току  $\bar{I}_{\vartheta_1 a}$  — вектор  $x_{sa} I_{\vartheta_1 a}$ .

Замыкающий вектор  $E_{ad}$  есть э. д. с., индуцируемая в фазе  $a$  потоком воздушного зазора  $\Phi_d$ . По характеристике холостого хода фазы  $a$  (рис. 4) находится н. с.  $F_d$ , соответствующая э. д. с.  $E_{ad}$ , и откладывается на рис. 3 перпендикулярно вектору  $E_{ad}$  в сторону опережения. Геометрически вычтя из вектора  $F_d$  вектор  $F'_n$ , найдем н. с. обмотки возбуждения  $F_f$ . На рис. 4 можно найти э. д. с.  $E_a$  и отложить ее перпендикулярно вектору  $F_f$  в сторону отставания.

Следует отметить, что токи нулевой последовательности, проходя по несимметричной многофазной обмотке, создают результирующую н. с. реакции якоря нулевой последовательности, неподвижную по отношению к обмотке. Описанный выше способ нахождения векторов  $F_n$  и  $F_{ob}$  обеспечивает учет н. с. реакции якоря от токов нулевой последовательности.

Для двух других фаз  $b$  и  $c$  векторные диаграммы строятся аналогичным образом. Взаимное положение векторных диаграмм напряжений для фаз  $a$ ,  $b$  и  $c$  можно определить либо располагая векторы э. д. с.  $E_a$ ,  $E_b$  и  $E_c$  под углами  $\alpha_{ab}$ ,  $\alpha_{bc}$  и  $\alpha_{ca}$  друг к другу, либо располагая оси фаз или векторы токов  $I_a$ ,  $I_b$  и  $I_c$  под углами  $\beta_{ba}$ ,  $\beta_{cb}$  и  $\beta_{ac}$ . В первом случае равенство углов, образуемых векторами токов на диаграмме трех фаз, углам  $\beta_{ba}$ ,  $\beta_{cb}$  и  $\beta_{ac}$ , во втором случае равенство углов, образуемых векторами э. д. с.  $E_a$ ,  $E_b$  и  $E_c$ , фазным углам  $\alpha_{ab}$ ,  $\alpha_{bc}$  и  $\alpha_{ca}$  может служить проверкой правильности выбора параметров и построения диаграмм. Соединив концы векторов фазных напряжений на векторной диаграмме трех фаз, получим векторы линейных напряжений обмотки статора синхронной машины.

**Векторная диаграмма напряжений явнополюсной синхронной машины с несимметричной обмоткой статора.** Построение векторной диаграммы явнополюсной синхронной машины для фазы  $a$  производится следующим образом (рис. 5). Ось фазы  $a$  направлена по вертикали вверх. С рис. 1 перенесены на рис. 5 векторы  $I_a$ ,  $I_0$ ,  $F_n$  и  $F_{ob}$ . Векторы  $I_{\vartheta_1 a}$  и  $I_{\vartheta_2 a}$  проведены по направлению векто-

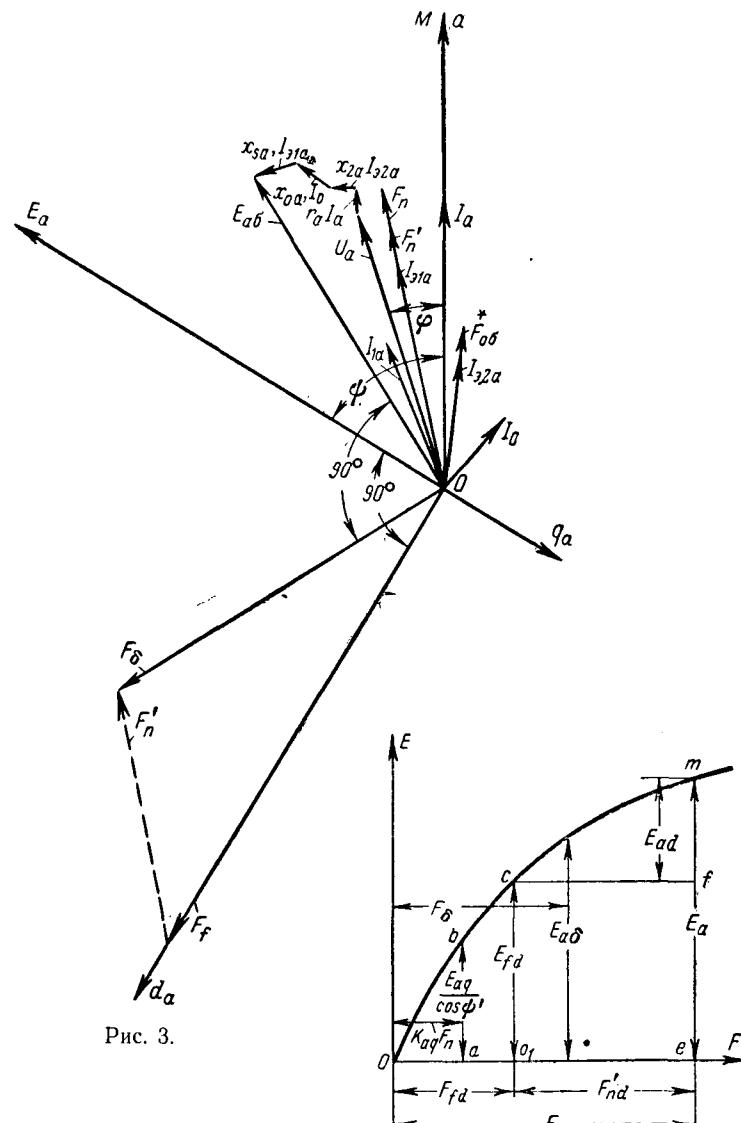


Рис. 3.

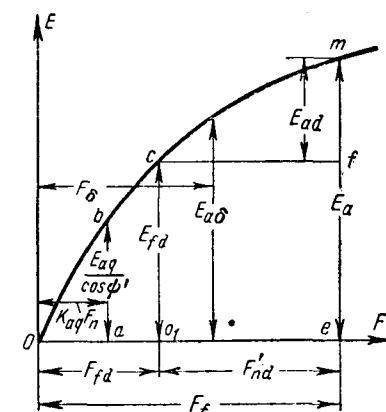


Рис. 4.

ров соответственно  $F_n$  и  $F_{ob}$ . Вектор заданного напряжения фазы  $a$   $U_a$  отложен под заданным углом  $\varphi$  к вектору тока  $I_a$ . От конца вектора  $U_a$  последовательно отложены векторы падений напряжений:  $r_a I_a$  (параллельно току  $\bar{I}_a$ ),  $x_{2a} I_{\vartheta_2 a}$  (перпендикулярно току  $\bar{I}_{\vartheta_2 a}$ ),  $x_{0a} I_0$  (перпендикулярно току  $\bar{I}_0$ ) и  $x_{sa} I_{\vartheta_1 a}$  (перпендикулярно току  $\bar{I}_{\vartheta_1 a}$ ).

Соответственно н. с.  $\kappa_{aq} F_n$  по рис. 4 найдена величина  $\frac{E_{ad}}{\cos \psi}$  и отложена перпендикулярно вектору  $F_n$ . Конец вектора  $\frac{E_{ad}}{\cos \psi}$  (точка  $b$ ) соединен с началом координат О. Таким образом определены направления осей ротора  $d_a$  и  $q_a$ . Из точки  $g$  опущен на ось  $q_a$  перпендикуляр  $gc$ , равный э. д. с. поперечной реакции якоря  $E_{aq}$ . Отрезок  $oc$  будет равен э. д. с.  $E_{fd}$ .

На рис. 4 по э. д. с.  $E_{fd} = \overline{oc}$  определена н. с.  $F_{fd} = \overline{Oc}$ . Намагничивающая сила  $F_n$  разложена на продольную  $F_{nd}$  и поперечную  $F_{nq}$  составляю-

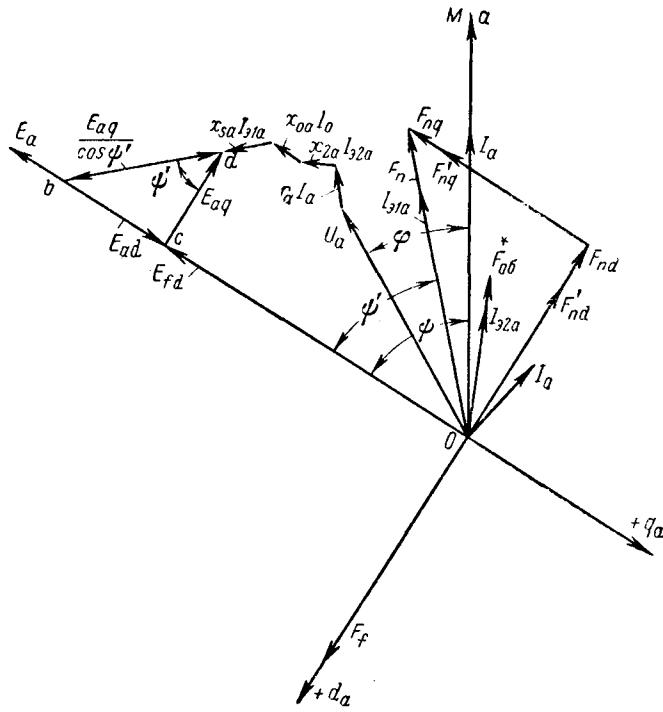


Рис. 5.

щие. Намагничающая сила обмотки возбуждения равна:

$$F_f = F_{fd} + F'_{nd}, \quad (15)$$

где

$$F'_{nd} = \kappa_{ad} F_{nd} = \kappa_{ad} F_n \sin \psi'. \quad (16)$$

По рис. 4 соответственно н. с.  $F_f$  определена э. д. с. в фазе  $a$  статора  $E_a$  и отложена по оси  $q_a$  на рис. 5.

Взаимное положение векторных диаграмм отдельных фаз определяется так же, как и в случае неявнополюсной машины, т. е. путем расположения векторов э. д. с.  $E_a$ ,  $E_b$ ,  $E_c$  под углами  $\alpha_{ab}$ ,  $\alpha_{bc}$  и  $\alpha_{ca}$  друг к другу, либо путем расположения векторов токов  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  под углами  $\beta_{ba}$ ,  $\beta_{cb}$  и  $\beta_{ac}$ .

**Пример.** Для принципиальной проверки предлагаемого способа построения векторной диаграммы и высказанного выше положения о том, что в первом приближении индуктивные сопротивления отдельных фаз можно считать прямо пропорциональными квадратам их эффективных чисел витков, построена по опытным данным векторная диаграмма синхронного генератора с несимметричной обмоткой статора (рис. 6).

Генератор имеет: успокоительную обмотку, отношения эффективных чисел витков фаз  $w_a : w_b : w_c = 60 : 34,5 : 69,1 = \sqrt{3} : 1 : 2$  и углы, образованные фазными осями:  $\alpha_{ab} = 150^\circ$ ,  $\alpha_{bc} = 120^\circ$ ,  $\alpha_{ca} = 90^\circ$ .

Можно доказать, что при таком соотношении эффективных чисел витков и фазных углов фазные э. д. с. удовлетворяют формулам вида (17), обеспечивающим при соединении обмотки в звезду симметрию линейных э. д. с. при несимметрии фазных э. д. с.:

$$E_a = \frac{E_b^2 - E_c^2}{2(E_b \cos \alpha_{ba} - E_c \cos \alpha_{ca})}. \quad (17)$$

Обмотка статора и нагрузка соединены в звезду. При опыте замерены: фазные напряжения машины  $U_a = 60$  в,  $U_b = 35$  в,  $U_c = 70$  в; фазные напряжения нагрузки  $U_{na} = 52,5$  в,  $U_{nb} = 53,8$  в,  $U_{nc} = 50,5$  в; линейные напряжения  $U_{ba} = 92,5$  в,  $U_{cb} = 92,5$  в,  $U_{ac} = 89,5$  в; фазные токи машины и нагрузки  $I_a \approx I_b \approx I_c = 10$  а,  $\cos \Phi_n = 0,64$ ; ток возбуждения  $I_f = 0,82$  а.

Так как нагрузка симметрична, то токи обратной и нулевой последовательностей равны нулю.

На рис. 6 ось фазы с направлена по вертикали вверх. Ось фазы  $a$  опережает на  $90^\circ$ , а ось фазы  $b$  отстает на  $120^\circ$  от оси фазы  $c$ . Ось мгновенных значений  $OM$  направлена по оси фазы  $c$ . Диаграмма строится для момента времени, когда ток в фазе  $c$  имеет максимальное значение, поэтому векторы тока и н. с. фазы  $c$  направлены по линии  $OM$ . Под углами  $120^\circ$  к вектору  $I_c$  отложены токи  $I_a$  и  $I_b$ .

Величины прямых и обратных н. с. фаз  $c$ ,  $b$  и  $a$  при токах в фазах 10 а согласно формуле (1) равны:

$$F_{nc} = F_{ob\ c} = 0,637 \frac{w_c}{p} \sqrt{2} I_c = 0,637 \frac{72 \cdot 0,96}{2} \sqrt{2} \cdot 10 = 312,$$

$$F_{nb} = F_{ob\ b} = F_{nc} \frac{w_b}{w_c} = 312 \frac{1}{2} = 156,$$

$$F_{na} = F_{ob\ a} = F_{nc} \frac{w_a}{w_c} = 312 \frac{\sqrt{3}}{2} = 270.$$

В рассматриваемый момент прямые н. с. фазы  $a$  и  $b$   $F_{na}$  и  $F_{nb}$  отстают от своих фазовых осей  $a$  и  $b$  соответственно на угол  $120^\circ$  между токами  $I_c$  и  $I_a$ , и на угол  $240^\circ$  между токами  $I_c$  и  $I_b$ . Сложив геометрически векторы всех фазных прямых н. с.  $F_{na}$ ,  $F_{nb}$  и  $F_{nc}$ , получим прямую н. с. машины  $F_n$ , равную 720 ампер-виткам.

По формуле (7) определяются эквивалентные токи фаз  $c$ ,  $b$  и  $a$  прямой последовательности:

$$I_{ac} = I_{a1\ c} = 1,11 \frac{p}{mw_c} F_n = 1,11 \frac{2 \cdot 720}{3 \cdot 72 \cdot 0,96} = 7,65 \text{ а;}$$

$$I_{ab} = I_{a1\ b} = I_{a1\ c} \frac{w_c}{w_b} = 7,65 \cdot 2 = 15,3 \text{ а;}$$

$$I_{aa} = I_{a1\ a} = I_{a1\ c} \frac{w_c}{w_a} = 7,65 \frac{2}{\sqrt{3}} = 8,85 \text{ а.}$$

Вектор  $I_{a1c}$  должен быть направлен по вектору н. с.  $F_n$ . Векторы прямой н. с. и эквивалентные токи для фаз  $a$  и  $b$  направляются к вектору  $I_{a1c}$  под фазовыми углами  $90^\circ$  и  $120^\circ$  в сторону отставания и опережения.

Ток фазы  $c$ , эквивалентный реакции якоря прямой последовательности, равен  $I_{a1c} = 7,65$  а, в то время как действительные токи фаз  $a$ ,  $b$  и  $c$  равны 10 а. Уменьшение тока произошло потому, что эффективные числа витков в фазах  $a$  и  $b$  меньше чем в фазе  $c$ , т. е. такую же прямую н. с.  $F_n = 720$  симметричная обмотка с одинаковыми числами витков во всех фазах, такими же, как и у фазы  $c$ , создает при меньшем токе.

Для нахождения обратной н. с. машины на рис. 6 отложены: обратная н. с. фазы  $c$  —  $F_{ob\ c}$  по оси  $c$ , н. с. фазы  $a$  —  $F_{ob\ a}$  под углом  $120^\circ$  к оси  $a$  в сторону опережения и н. с. фазы  $b$  —  $F_{ob\ b}$  под углом  $120^\circ$  к оси  $b$  в сторону опережения. Сложив векторы фазных обратных н. с.  $F_{ob\ a}$ ,  $F_{ob\ b}$  и  $F_{ob\ c}$ , получим результирующую обратную н. с. машины  $F_{ob}$ . В рассматриваемом режиме обратная н. с. равна нулю. Следовательно, и ток фазы  $c$ , эквивалентный обратной н. с. реакции якоря ( $I_{a2c}$ ), также равен нулю.

Сдвиг по фазе друг относительно друга векторов линейных напряжений, а также векторов фазных напряжений машины и фазных напряжений нагрузки можно определить путем построения (по трем известным сторонам) трех соответствующих треугольников напряжений.

Согласно осциллограмме вектор напряжения  $U_a$  надо провести под углом  $77^\circ$  к вектору  $I_a$  в сторону опережения. Далее, проведя под надлежащими углами векторы  $U_b$  и  $U_c$  и соединив концы этих векторов, получим треугольник  $ABC$  линейных напряжений. Из точек  $A$ ,  $B$ ,  $C$  как из центров проводят до взаимного пересечения дуги радиусами  $U_{na}$ ,  $U_{nb}$  и  $U_{nc}$ . Если дуги не пересекаются в одной точке, а образуют треугольник, то начало векторов фазных напряжений нагрузки  $O_n$  надо взять в центре тяжести треугольника, образованного дугами.

От точки  $C$  параллельно току  $I_c$  откладываются вектор  $r_c I_c = 0,36 \cdot 10 = 3,6$  в и перпендикулярно эквивалентному току  $I_{ac}$  — вектор  $x_{sc} I_{ac} = 1,2 \cdot 7,65 = 9,15$  в.

Коэффициент попечной реакции якоря для опытной синхронной машины из рис. 177 в (см. сноску 1) равен  $\kappa_{aq} = 0,288$ . Прямая н. с., приведенная к попечной оси в масштабе тока возбуждения, равна:

$$I_{fq} = \frac{\kappa_{aq} F_n}{2w_b} = \frac{0,288 \cdot 730}{2 \cdot 1300} = 0,08 \text{ а.}$$

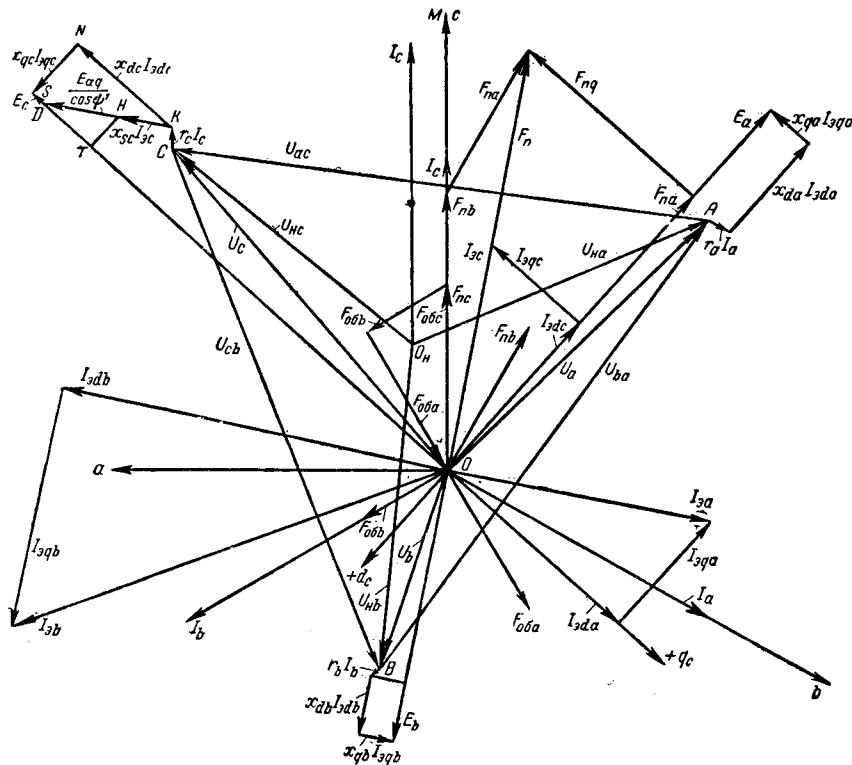


Рис. 6.

На рис. 4 по току возбуждения  $I_{fq}$  находится э. д. с.  $\frac{E_{aq}}{\cos \psi} = 12,5$  в и откладывается на продолжении вектора  $x_{sc}I_{sc}$ . Конец  $D$  вектора  $\frac{E_{aq}}{\cos \psi}$  соединяется с началом векторов  $O$ . Таким образом, находится направление оси  $q_c$  и вектора э. д. с. в фазе  $c - E_c$ . Ось  $d_c$  перпендикулярна оси  $q_c$ . Зная направления осей  $d_c$  и  $q_c$ , можно разложить эквивалентный ток фазы  $c$   $I_{sc}$  на продольную  $I_{3dc}$  и поперечную  $I_{3qc}$  составляющие.

Величину э. д. с. в фазе  $c$   $E_c$  можно найти двояким путем. Если из опыта известен ток возбуждения  $I_f = 0,82$  а, то по рис. 4 определяется э. д. с.  $E_c \approx 92$  в. Проведя из конца вектора  $E_c$  линию  $NS$ , параллельную оси  $d_c$ , а из конца  $r_c I_c$  — линию  $NK$ , параллельную оси  $q_c$ , получим падения напряжения в поперечном и продольном синхронных сопротивлениях фазы  $c$  машины:  $x_{qc} I_{3qc} = x_{qc} 3,9 = 11,5$  в,  $x_{dc} I_{3dc} = x_{dc} 6,55 = 20,5$  в. Отсюда насыщенные значения синхронных сопротивлений

$$x_{qc} = \frac{11,5}{3,9} = 2,95 \text{ ом}, \quad x_{dc} = \frac{20,5}{6,55} = 3,1 \text{ ом}.$$

Если неизвестен ток возбуждения, то после нахождения точки  $D$  он может быть найден следующим образом. Из точки  $H$  опускается перпендикуляр  $HT$  на ось  $q_c$ . По э. д. с.  $E_{fa} = OT$  на рис. 4 определяется  $I_{fd} = 0,62$  а. Графически находится продольная составляющая прямой н. с.  $F_{nd}$ . Ток возбуждения, соответствующий н. с.  $F_{nd}$ , равен:

$$I_{fnd} = \frac{\kappa_{ad} F_{nd}}{2\omega_b} = \frac{0,883 \cdot 618}{2 \cdot 1300} = 0,208 \text{ а.}$$

Ток возбуждения при нагрузке  $I_f = I_{fd} + I_{fnd} = 0,62 + 0,208 = 0,828$  а (опытный замер показал  $I_f = 0,82$  а).

По реальным характеристикам холостого хода для фаз  $a$ ,  $b$  и  $c$  соответственно току возбуждения  $I_f$  находятся э. д. с.  $E_a$ ,  $E_b$  и  $E_c$ . Углы, составляемые векторами этих э. д. с., равны фазным углам обмотки статора, поэтому векторы

$E_b$  и  $E_a$  надо отложить к вектору  $E_c$  соответственно под углами  $120^\circ$  и  $270^\circ$  в сторону опережения.

Эквивалентные токи фаз  $a$  и  $b$  разлагаются на продольные и поперечные составляющие.

От концов векторов фазовых напряжений  $U_a$  и  $U_b$  параллельно токам, соответственно  $I_a$  и  $I_b$ , откладываются векторы  $r_a I_a$  и  $r_b I_b$ . От концов этих векторов проводятся линии, параллельные векторам э. д. с.  $E_a$  и  $E_b$ . Из концов  $E_a$  и  $E_b$  проводятся линии, перпендикулярные этим э. д. с. Таким образом, получаются величины падений напряжений в синхронных индуктивных сопротивлениях по поперечной и продольной осям фаз  $a$  и  $b$ :

$$x_{qa} I_{3qa} = x_{qa} 4,5 = 9 \text{ в}; \quad x_{da} I_{3da} = x_{da} \cdot 7,6 = 19 \text{ в};$$

$$x_{qb} I_{3qb} = x_{qb} 8,05 = 5,75 \text{ в}; \quad x_{db} I_{3db} = x_{db} 12,9 = 10 \text{ в}.$$

Отсюда синхронные сопротивления по поперечной и продольной осям фаз  $a$  и  $b$  в омах:

$$x_{qa} = \frac{9,0}{4,5} = 2,0; \quad x_{da} = \frac{19,0}{7,6} = 2,5;$$

$$x_{qb} = \frac{5,75}{8,05} = 0,715; \quad x_{db} = \frac{10}{12,9} = 0,775.$$

Отношения квадратов эффективных чисел витков фаз  $b$ ,  $a$  и  $c$  равны  $w_b^2 : w_c^2 = 1 : 3 : 4$ . Отношения синхронных сопротивлений фаз  $b$ ,  $a$  и  $c$  по поперечной и продольной осям по данным, полученным из векторной диаграммы, равны:

$$x_{qb} : x_{qa} : x_{qc} = 1 : 2,80 : 4,1; \quad x_{db} : x_{da} : x_{dc} = 1 : 3,2 : 4,00.$$

Как следовало ожидать, отношения синхронных индуктивных сопротивлений получились примерно равными отношениям квадратов эффективных чисел витков фаз.

Изложенный в данной работе метод построения векторных диаграмм применим и для однофазных машин.

[17.12.1962]



# Применение сверхпроводников для возбуждения электрических машин

Доктор техн. наук, проф. Е. Я. КАЗОВСКИЙ и инж. В. П. КАРЦЕВ

Институт электромеханики

В последнее время появился ряд работ, в которых рассматриваются возможности использования явления сверхпроводимости в электротехнических устройствах, в частности в электрических машинах [Л. 1—5].

Благодаря использованию недавно найденных сверхпроводников, способных сохранять сверхпроводимость в сильных магнитных полях, стало возможным сравнительно легко получать магнитные поля напряженностью 30—70 кэ и более в объемах от нескольких кубических сантиметров до нескольких литров. При этом по сравнению с обычными соленоидами, в которых используются медные обмотки, охлаждаемые водой, снижается стоимость установки, значительно сокращается занимаемое установкой место, отпадает необходимость в весьма мощном питающем электроагрегате и громоздкой системе охлаждения. Так, для создания напряженности поля 88 кэ в объеме 200 см<sup>3</sup> обычный медный соленоид с водяным охлаждением потребует 1 500 квт подводимой мощности, 4 000 л воды в 1 мин для охлаждения обмоток и значительной площади для установки энергетического и насосного оборудования. Сверхпроводящий соленоид с теми же техническими характеристиками может быть переносным. Суточное потребление этой системой жидкого гелия составляет 2—3 л. Стоимость установки со сверхпроводниками будет в 10 раз меньше обычной [Л. 4].

Наряду с исследованием перспектив использования сверхпроводников для создания магнитного поля в лазерах, мощных ускорителях частиц, магнитогидродинамических генераторах представляется целесообразным исследовать вопрос о возможности применения сверхпроводящих обмоток в качестве систем возбуждения электрических машин.

Одно из основных требований, предъявляемых к системам возбуждения электрических машин, заключается в обеспечении по возможности постоянства результирующего магнитного потока, поступающего в якорь машины, и независимости этого потока от нагрузки машины. В существующих конструкциях электрических машин постоянство результирующего потока полностью обеспечить не удается, несмотря на сложные схемы автоматического регулирования возбуждения. В то же время применение сверхпроводящего контура для цепи возбуждения может обеспечивать постоянство результирующего магнитного потока, сцепляющегося с контуром, вне зависимости от наличия встречных магнитных потоков и изменения результирующего сопротивления магнитной цепи при движении ротора. Это свойство сверхпроводящего контура может быть записано как

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0.$$

Способность сверхпроводящего контура цепи возбуждения к «саморегулированию» позволяет рассчитывать на создание электрических машин с высокой статической и динамической устойчивостью при применении сверхпроводящих контуров для цепи возбуждения. Применение таких контуров даст также возможность значительно повысить плотность тока в обмотке возбуждения и, следовательно, существенно увеличить значение магнитной индукции в машине.

Поскольку объем электрической машины в первом приближении обратно пропорционален индукции магнитного поля в зазоре, то увеличение применяемых индукций позволит уменьшить габариты машины. Отсутствие омических потерь в сверхпроводниках даст возможность повысить к. п. д. машины.

Плотности тока в цепи возбуждения могут быть доведены до весьма высоких значений; поэтому представляется возможным исключить из сверхпроводниковых машин сталь как магнитный материал. Это приведет к еще большему повышению к. п. д.

В [Л. 1] описывается проект турбогенератора мощностью 600 Мвт со сверхпроводящей обмоткой возбуждения. Эта обмотка, расположенная на статоре, создает поле напряженностью 100 кэ, в котором вращается при нормальной температуре ротор с трехфазной обмоткой. Напряжение снимается с ротора при помощи ртутных ванн. Сталь, как магнитопровод, из ротора исключена. За счет этого стало возможным разместить на роторе дополнительную медную обмотку. Длина ротора при диаметре 1 м составляет 2 м. Мощность гелиевого сжижителя, необходимого для содержания обмотки возбуждения этого турбогенератора при температуре 4,2°К, пренебрежимо мала, так как омические потери в сверхпроводнике отсутствуют и жидкий гелий тратится лишь на компенсацию теплопритоков извне, вызванных несовершенством тепловой изоляции. Коэффициент полезного действия турбогенератора составляет 99,9%.

Для создания электрических машин с высокими техническими показателями, использующих сверхпроводники, предстоит решить ряд специфических проблем. Одна из них заключается в выяснении возможности использования сверхпроводников, находящихся при температуре, близкой к абсолютному нулю, в устройствах, имеющих в большей своей части обычную температуру.

До сих пор распространено мнение, что сверхпроводники можно использовать эффективно лишь в тех устройствах, которые сами целиком помещены в область с низкой температурой, из-за конструктивных трудностей создания надлежащей тепловой изоляции с учетом необходимости исключения чрезмерно больших магнитных полей рассея-

ния. В действительности опасность образования слишком больших потоков рассеяния за счет больших зазоров, вызываемых наличием неизбежной тепловой изоляции между сверхпроводником и магнитопроводом, может быть снижена соответствующим подбором формы обмоток и магнитопровода. При полях с индукциями, большими, чем индукция насыщения стали, можно применить сверхпроводящие экраны.

Для исследования возможности использования сверхпроводящей обмотки возбуждения в обычных электрических машинах был создан макет машины постоянного тока, в котором вместо обычной обмотки возбуждения была применена сверхпроводящая катушка. Этот макет был спроектирован и построен сотрудниками Института электромеханики и Института физических проблем АН СССР. Большую помощь в построении макета и решении ряда специальных криогенных вопросов при выполнении экспериментальной работы оказали сотрудники Института физических проблем АН СССР чл.-корр. АН СССР Н. Е. Алексеевский и Н. Н. Михайлов, которые предоставили использованный в работе сверхпроводящий соленоид.

Электрическая машина со сверхпроводящим возбуждением состоит из двух частей — низкотемпературной, находящейся при температуре 4,2° К (температура кипения жидкого гелия), и высокотемпературной, находящейся при комнатной температуре (рис. 1).

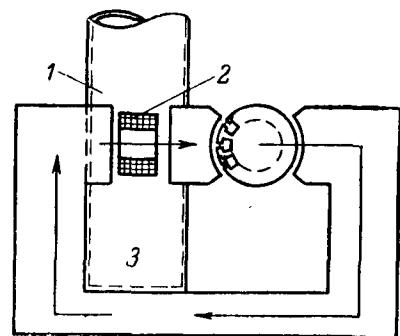
Низкотемпературная часть состоит из металлического цилиндрической формы дьюарова сосуда (диаметром 41 мм) с двойными медными стенками, пространство между которыми вакуумировано. Общая толщина теплоизоляции 5 мм. Внутри дьюара расположена ниобиево-оловянная короткозамкнутая катушка, охлаждаемая жидким гелием. Магнитная ось катушки перпендикулярна оси дьюара.

Сверхпроводящая катушка возбуждения этой машины относится к типу короткозамкнутых соленоидов и выполнена из ниобий-оловянного сплава. Она содержит 400 витков проволоки, изготовленной по методу, описанному в [Л. 6]. В сверхпроводниковой катушке при помощи электромагнита, создающего поле 20 кэ, «замораживался» магнитный поток. «Замораживание» производилось следующим образом: дьюар помещался между полюсами электромагнита так, чтобы ось катушки совпадала с направлением силовых линий в зазоре. Гелий в сосуд при этом не был залит. Таким образом, катушка имела температуру азотной рубашки дьюара 77° К и не являлась сверхпроводящей (температура перехода  $T_c$  для сплава Nb<sub>3</sub>Sn составляет 18° К). Затем дьюар с катушкой заливается гелием (температура 4,2° К), и катушка становилась сверхпроводящей.

При постепенном уменьшении тока в обмотке электромагнита до нуля в катушке наводится ток, поддерживающий неизменным магнитный поток, связанный с катушкой. Таким образом, катушка сама обеспечивает намагничивание магнитной цепи с той же индукцией, что и индукция электромагнита. При изменении сопротивления магнитной

Рис. 1. Схема цепи возбуждения машины постоянного тока со сверхпроводниковым возбуждением.

1 — металлический дьюар;  
2 — катушка из Nb<sub>3</sub>Sn;  
3 — жидкий гелий.



цепи ток в катушке изменяется таким образом, чтобы соблюдалось условие  $\Psi = \text{const}$ .

«Высокотемпературная» часть установки состоит из О-образного магнитопровода, выполненного из стали типа Армко (рис. 1), разрезанного в двух местах. В первый зазор помещен ротор машины постоянного тока типа СЛ-161, во второй — сверхпроводящая катушка, находящаяся в дьюаре. Магнитный поток, создаваемый сверхпроводящей катушкой, замыкается по О-образному магнитопроводу, проходя через ротор машины типа СЛ-161. При вращении ротора в поле, создаваемом сверхпроводящей катушкой, в нем возникает э. д. с., снимаемая обычным образом неподвижными щетками.

На рис. 2 приведена схема испытания машины. Схема цепи приводного двигателя типа СЛ-161 пояснений не требует. Схема цепи машины со сверхпроводящей катушкой аналогична схеме при возбуждении машины постоянным магнитом. Налево от цепи приводного двигателя изображен стробоскоп, при помощи которого измерялась скорость вращения ротора.

На рис. 3 приведена фотография экспериментальной установки. Внизу видны две спаренные машины СЛ-161, у одной из которых (правой) удалена обмотка возбуждения и вместо нее вставлена сверхпроводящая катушка. Она находится в «пальце» гелиевого дьюара сосуда, укрепленного на штанге. На крышке сосуда видны патрубки, при помощи которых дьюар мог быть подсоединен к другому сосуду для заливки гелия и через которые испарившийся гелий поступал в газгольдер (виду дорогоизнаны гелия его нецелесообразно выпускать

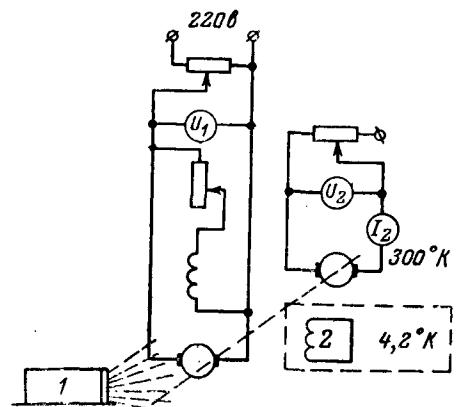


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки.  
1 — стробоскоп; 2 — короткозамкнутая сверхпроводниковая катушка.

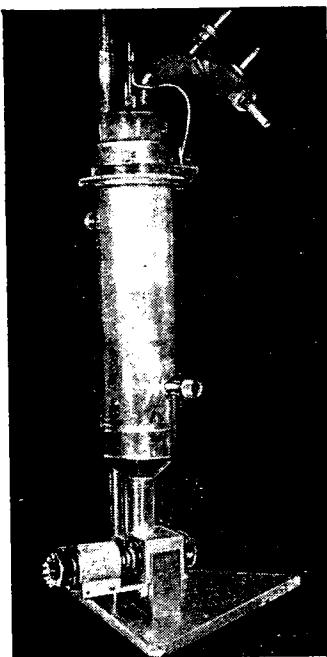


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки.

ным магнитом равных с катушкой размеров, то можно, измеряя напряжение машины при вращении ее посторонним двигателем, сравнить в одном масштабе, определяемом индуктируемыми напряжениями, напряженности магнитных полей, создаваемые постоянным магнитом и сверхпроводящей катушкой. Такое сравнение было проведено для постоянного магнита, выполненного из сплава «аллико». Результаты этого сравнения (характеристики холостого хода и внешние) приведены на рис. 4 и 5.

Из сравнения характеристик холостого хода видно, что напряжение, снимаемое с машины при «сверхпроводящем» возбуждении, больше напряжения при возбуждении постоянным магнитом почти в 20 раз.

Из сравнения внешних характеристик можно сделать вывод, что максимальная мощность машины со сверхпроводящим возбуждением превышает максимальную мощность машины с постоянным магнитом более чем в 200 раз.

Крутизна  $\frac{dU_2}{dI_2}$  внешней характеристики машины со сверхпроводниками оказалась несколько

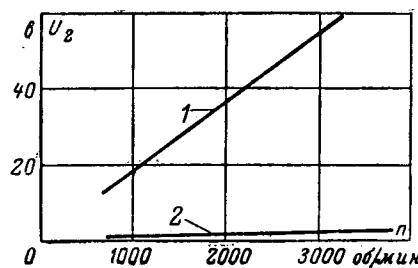


Рис. 4. Характеристики холостого хода  $U_2=f(n)$  машины типа СЛ-161 со сверхпроводниковым возбуждением (1) и возбуждением постоянным магнитом (2).

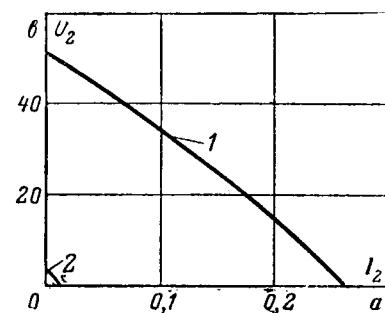


Рис. 5. Внешние характеристики  $U_2=f(I_2)$  машины типа СЛ-161 со сверхпроводниковым возбуждением (1) и возбуждением постоянным магнитом (2).

в атмосфере). В середине дьюара виден патрубок, через который производится вакуумирование межстенной полости дьюарова сосуда.

Если вынуть из магнитопровода сверхпроводящую катушку и заменить ее в освободившемся зазоре сильным постоянным магнитом равных с катушкой размеров, то можно, измеряя напряжение машины при вращении ее посторонним двигателем, сравнить в одном масштабе, определяемом индуктируемыми напряжениями, напряженности магнитных полей, создаваемые постоянным магнитом и сверхпроводящей катушкой. Такое сравнение было проведено для постоянного магнита, выполненного из сплава «аллико». Результаты этого сравнения (характеристики холостого хода и внешние) приведены на рис. 4 и 5.

Из сравнения характеристик холостого хода видно, что напряжение, снимаемое с машины при «сверхпроводящем» возбуждении, больше напряжения при возбуждении постоянным магнитом почти в 20 раз.

Из сравнения внешних характеристик можно сделать вывод, что максимальная мощность машины со сверхпроводящим возбуждением превышает максимальную мощность машины с постоянным магнитом более чем в 200 раз.

Крутизна  $\frac{dU_2}{dI_2}$  внешней характеристики машины со сверхпроводниками оказалась несколько

меньше крутизны внешней характеристики машины с постоянным магнитом.

Во время эксперимента было обнаружено некоторое снижение снимаемого с машины со сверхпроводниками напряжения со временем, причина которого осталась пока не выясненной.

**Заключение.** Проводимые за рубежом и в нашей стране исследования показывают, что электротехнические устройства со сверхпроводниками являются весьма перспективными.

Основные преимущества устройств со сверхпроводниками — высокий к. п. д., малые размеры и вес, возможность создания весьма интенсивных магнитных полей — делают их незаменимыми в решении многих технических задач.

Выполненные исследования электрической машины со сверхпроводящим возбуждением показали, что при замене постоянного магнита сверхпроводящей катушкой напряжение машины возросло в 20 раз, а максимальная мощность — в 200 раз.

#### Литература

- McFee R., Applications of superconductivity to the generation and distribution of electric power, El. Eng. 1962, February.
- Использование сверхпроводимости для повышения экономичности электрооборудования, ЦИНТИ, 1962.
- Buchhold T. A., Applications of superconductivity, Scientific American, 1960, № 74.
- Казовский Е. Я. и Карцев В. П., О возможностях использования сверхпроводников в электротехнике, «Электротехника», 1964, № 1.
- Supraleitung STZ, 1962, № 19.
- Алексеевский Н. Е. и Михайлов Н. Н., ЖЭТФ, 1961, № 6 (12).

[23.8.1963]



# О теории и применении составляющих трехфазной системы

Инж. А. Б. ВИТАНОВ

Институт энергетики, София (Болгария)

Эффективным средством расчета несимметричных режимов электрических сетей являются различные составляющие трехфазной системы. Поэтому способы получения и применения систем составляющих приобрели в последнее время большое значение. В статье рассматриваются некоторые общие вопросы разложения трехфазной системы на составляющие.

**Фазные величины и связанные с ними затруднения.** Трехфазная электрическая цепь характеризуется в каждой своей точке тремя фазными токами  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  и тремя напряжениями  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  или, иначе, матрицами фазных токов и напряжений:

$$\mathbf{I}_\Phi = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U}_\Phi = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Каждому участку или элементу трехфазной сети соответствует определенная матрица сопротивлений

$$\mathbf{Z}_\Phi = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

устанавливающая связь между напряжениями по концам этого участка и протекающими через него токами:

$$\mathbf{U}'_\Phi - \mathbf{U}''_\Phi = \mathbf{Z}_\Phi \mathbf{I}_\Phi.$$

Элементами матрицы сопротивления являются собственные и взаимные сопротивления фаз.

Матрицы сопротивлений элементов симметричной трехфазной сети могут быть двух видов:

1. Все статические элементы, для которых сопротивления прямой  $Z_1$  и обратной  $Z_2$  последовательностей одинаковы (линии, трансформаторы, реакторы и т. п.), имеют симметричные матрицы сопротивлений

$$\mathbf{Z}'_\Phi = \begin{bmatrix} Z_a & Z_b & Z_b \\ Z_b & Z_a & Z_b \\ Z_b & Z_b & Z_a \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2. Электрическим машинам, для которых  $Z_1 \neq Z_2$ , соответствуют циклически-симметричные матрицы сопротивлений

$$\mathbf{Z}''_\Phi = \begin{bmatrix} Z_a & Z_b & Z_c \\ Z_c & Z_a & Z_b \\ Z_b & Z_c & Z_a \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) обозначено:

$$Z_a = Z_{AA} = Z_{BB} = Z_{CC};$$

$$Z_b = Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA};$$

$$Z_c = Z_{AC} = Z_{BA} = Z_{CB}.$$

Генераторы, кроме матрицы сопротивления вида (4), характеризуются также своей матрицей э. д. с., которая при симметрии фазных э. д. с. имеет вид

$$\mathbf{E}_\Phi = \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ a^2 E \\ a E \end{bmatrix}. \quad (5)$$

При симметричном режиме в схеме замещения нет несимметричных элементов, и все матрицы сопротивлений имеют вид (3) или (4), т. е. результирующая матрица сопротивлений в общем случае имеет вид (4). В этих условиях токи трех фаз симметричны, а матрицы сопротивлений можно привести к диагональному виду, учитывая взаимные сопротивления путем соответствующих изменений собственных сопротивлений. Таким образом, схемы замещения трех фаз можно рассматривать независимо и расчет симметричных режимов вести по одной фазе.

В несимметричном режиме положение изменяется. В местах нарушения симметрии матрицы сопротивлений имеют вид (2), и в расчетах приходится учитывать собственные и взаимные сопротивления каждого элемента сети. При этом нельзя выделить уравнения и схемы для отдельных фаз, и расчет необходимо вести одновременно для трех фаз. Моделирование режима однофазной моделью также становится невозможным. В этих условиях исследование несимметричных режимов по трехфазной схеме замещения, состоящей из отдельных схем замещения для симметричных элементов сети, осложняется в основном из-за наличия взаимных сопротивлений в матрицах (3) и (4). Вследствие этого схемы замещения для отдельных фаз оказываются связанными между собой не только в местах несимметрии, но и по всем элементам сети. Поэтому необходимо преобразовать систему фазных токов и напряжений таким образом, чтобы новые матрицы сопротивлений симметричных элементов получились диагональными. В этом и заключается основная задача представления фазных величин через их составляющие.

**Общие выражения составляющих и требования к ним.** Составляющие напряжений  $\mathbf{U}_c$ , э. д. с.  $\mathbf{E}_c$  и токов  $\mathbf{I}_c$  связаны линейно с фазными величинами:

$$\mathbf{U}_\Phi = \mathbf{m} \mathbf{U}_c; \quad \mathbf{E}_\Phi = \mathbf{m} \mathbf{E}_c; \quad (6)$$

$$\mathbf{I}_\Phi = \mathbf{n} \mathbf{I}_c. \quad (7)$$

Обозначим системы составляющих в общем случае через  $p$ ,  $q$ ,  $r$ . Тогда матрицы составляющих будут:

$$\mathbf{U}_c = \begin{bmatrix} U_p \\ U_q \\ U_r \end{bmatrix}; \quad \mathbf{E}_c = \begin{bmatrix} E_p \\ E_q \\ E_r \end{bmatrix}; \quad \mathbf{I}_c = \begin{bmatrix} I_p \\ I_q \\ I_r \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Матрицы преобразования напряжений (или э. д. с.)  $m$  и токов  $n$  имеют вид:

$$m = \begin{bmatrix} m_{Ap} & m_{Aq} & m_{Ar} \\ m_{Bp} & m_{Bq} & m_{Br} \\ m_{Cp} & m_{Cq} & m_{Cr} \end{bmatrix}; \quad n = \begin{bmatrix} n_{Ap} & n_{Aq} & n_{Ar} \\ n_{Bp} & n_{Bq} & n_{Br} \\ n_{Cp} & n_{Cq} & n_{Cr} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Они должны быть неособенными.

В системе составляющих  $p, q, r$  каждый элемент сети характеризуется матрицей сопротивлений

$$Z_c = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pq} & Z_{pr} \\ Z_{qp} & Z_{qq} & Z_{qr} \\ Z_{rp} & Z_{rq} & Z_{rr} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

которая связана с  $Z_\Phi$  соотношениями

$$Z_c = m^{-1} n Z_\Phi; \quad (11)$$

$$Z_\Phi = m n^{-1} Z_c. \quad (11a)$$

Преобразования, определяемые матрицами (9), возможно осуществить при помощи идеальных трансформаторов [Л. 1]. В практических целях желательно иметь такую систему составляющих, которая позволяла бы в собранной на расчетном столе комплексной схеме замещения измерять непосредственно фазные токи и напряжения. Отметим, что использование трансформаторов для реализации матрицы преобразования на практике возможно только в том случае, если все члены — действительные числа.

В настоящее время большое значение имеет моделирование. Поэтому целесообразно поставить требование, чтобы систему составляющих, полученную в результате преобразований (6) и (7), можно было использовать при работе на моделях. Для этого необходимо и достаточно, чтобы сумма мощностей по отдельным составляющим была пропорциональна мощности трехфазной системы [Л. 2]:

$$\dot{U}_p \hat{I}_p + \dot{U}_q \hat{I}_q + \dot{U}_r \hat{I}_r = k (\dot{U}_A \hat{I}_A + \dot{U}_B \hat{I}_B + \dot{U}_C \hat{I}_C).$$

Этому условию можно придать следующий вид [Л. 3]:

$$m^{-1} = k \hat{n}_t, \quad (12)$$

где  $k > 0$  — действительное число.

Для моделирования несимметричных режимов с применением составляющих, удовлетворяющих условию (12), в общем случае необходимы идеальные трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации. Теоретически изготовление таких трансформаторов возможно [Л. 4—6], однако целесообразность их практического использования сомнительна. В [Л. 3 и 7] указаны особые способы соединения схем замещения по отдельным составляющим (с удвоенным числом схем), которые позволяют отказаться от трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации. Что-

бы избежать этих затруднений, необходимо пользоваться составляющими, все члены матрицы преобразования которых действительны. Будем называть их реальными составляющими. В этом случае при моделировании достаточно иметь трансформаторы только с действительными коэффициентами трансформации. Как будет показано ниже, применение таких составляющих не всегда возможно, но в тех случаях, когда они применимы, им следует отдавать предпочтение.

Систематизируем основные требования к преобразованию фазных величин в составляющие:

1. Преобразование должно приводить матрицы сопротивлений типа (4) или, по меньшей мере, типа (3) к диагональному виду

$$Z'_c \text{ или } Z''_c = \begin{bmatrix} Z_p & 0 & 0 \\ 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & Z_r \end{bmatrix}. \quad (13)$$

2. Полученные составляющие должны быть физически реализуемы, т. е. удовлетворять условию (12) [Л. 2 и 3].

3. Желательно, чтобы все члены матрицы преобразований (9) были действительными числами.

Ниже рассматриваются условия, при которых возможно выполнить все эти требования.

**Общий вид симметричных и реальных составляющих.** Будем считать, что требование 2 всегда выполняется. В этом случае для приведения матриц (3) или (4) к диагональному виду (требование 1) необходимо иметь матрицы преобразования следующих видов:

$$m = \begin{bmatrix} 1/\hat{A}_0 & 1/\hat{A}_1 & 1/\hat{A}_2 \\ 1/\hat{A}_0 & a^2/\hat{A}_1 & a/\hat{A}_2 \\ 1/\hat{A}_0 & a/\hat{A}_1 & a^2/\hat{A}_2 \end{bmatrix}; \quad n = \frac{1}{3k} \begin{bmatrix} \hat{A}_0 & \hat{A}_1 & \hat{A}_2 \\ \hat{A}_0 & a^2\hat{A}_1 & a\hat{A}_2 \\ \hat{A}_0 & a\hat{A}_1 & a^2\hat{A}_2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Для преобразования к диагональному виду только матрицы (3) достаточно иметь матрицы преобразования следующих видов:

$$m = \begin{bmatrix} \frac{1}{\hat{A}} & \frac{\hat{B} + \hat{C}}{B^2 + C^2} & \frac{\hat{C} \cdot \hat{C} - \hat{B}}{\hat{D} \cdot B^2 + C^2} \\ \frac{1}{\hat{A}} & \frac{a^2\hat{B} + a\hat{C}}{B^2 + C^2} & \frac{\hat{C} \cdot a^2\hat{C} - a\hat{B}}{\hat{D} \cdot B^2 + C^2} \\ \frac{1}{\hat{A}} & \frac{a\hat{B} + a^2\hat{C}}{B^2 + C^2} & \frac{\hat{C} \cdot a\hat{C} - a^2\hat{B}}{\hat{D} \cdot B^2 + C^2} \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$n = \frac{1}{3k} \begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B} + \hat{C} & \frac{\hat{D}}{\hat{C}} (\hat{C} - \hat{B}) \\ \hat{A} & a^2\hat{B} + a\hat{C} & \frac{\hat{D}}{\hat{C}} (a^2\hat{C} - a\hat{B}) \\ \hat{A} & a\hat{B} + a^2\hat{C} & \frac{\hat{D}}{\hat{C}} (a\hat{C} - a^2\hat{B}) \end{bmatrix}.$$

Здесь  $\dot{A}_1, \dot{A}_2, \dot{A}_0, \dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{D}$  — произвольные комплексные числа, отличные от нуля;

$k$  — коэффициент пропорциональности в условии (12).

Доказательство выражений (14) и (15) весьма громоздко и в статье не приводится. В их справедливости можно убедиться, подставив матрицы  $m$  и  $n$  в соотношение (11).

Применяемые обычно симметричные составляющие, имеющие матрицу преобразований

$$m_{cc} = n_{cc} = l = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a \end{bmatrix}, \quad (14a)$$

можно получить как частный случай составляющих с матрицами (14) при  $\dot{A}_0 = \dot{A}_1 = \dot{A}_2 = 1, k = 1/3$ . Нетрудно видеть, что все другие частные случаи выражений (14) при  $m = n$  подобны симметричным составляющим, и поэтому этот класс мы назовем обобщенными симметричными составляющими.

Рассмотрим пути выполнения требования 3.

Из выражений (14) видно, что невозможно выбрать такие значения  $A_0, A_1, A_2$ , чтобы все члены матриц  $m$  и  $n$  были действительными, т. е. не существует системы реальных составляющих, которая обращала бы матрицы сопротивлений всех элементов симметричной сети в диагональные. Все члены могут быть действительными только у матрицы (15). Для этого необходимо и достаточно, чтобы

$$\dot{A} = A; \dot{C} = \dot{B}; \dot{D} = -jcB, \quad (16)$$

где  $c$  — действительное число.

Положив  $B = B_r + jB_i$  и соблюдая условие (16), из выражений (15) получим следующий общий вид матриц преобразования реальных составляющих:

$$m = \begin{bmatrix} \frac{1}{A} & \frac{1}{2B^2} \cdot 2B_r & \frac{1}{2cB^2} \\ \frac{1}{A} & -\frac{1}{2B^2}(B_r + \sqrt{3}B_i) - \frac{1}{2cB^2}(B_i - \sqrt{3}B_r) & \\ \frac{1}{A} & -\frac{1}{2B^2}(B_r - \sqrt{3}B_i) - \frac{1}{2cB^2}(B_i + \sqrt{3}B_r) & \end{bmatrix}; \quad (17)$$

$$n = \frac{1}{3k} \begin{bmatrix} A & 2B_r & 2cB_i \\ A & -(B_r + \sqrt{3}B_i) & -c(B_i - \sqrt{3}B_r) \\ A & -(B_r - \sqrt{3}B_i) & -c(B_i + \sqrt{3}B_r) \end{bmatrix}.$$

Реальные составляющие придают матрицам (4) квазидиагональную форму, и поэтому их применение нецелесообразно в тех случаях, когда необходимо учитывать циклическую симметрию элементов сети (см. требование 1). Однако в ряде случаев допустимо принимать, что все элементы сети имеют одинаковые сопротивления прямой и обратной последовательностей ( $Z_1 = Z_2$ ), т. е. что  $Z_b = Z_c$ . Такое предположение является, например, обычным при расчетах аварийных режимов для целей релейной защиты и т. п. По этим соображениям реальные

составляющие могут иметь довольно широкую область применения.

Из выражений (14) и (17) можно получить, как частные случаи, бесконечное множество систем составляющих. Среди них находятся и те немногие системы, которые описаны до сих пор в литературе. Так, к обобщенным симметричным составляющим относятся обычно применяемые симметричные составляющие ( $\dot{A}_0 = \dot{A}_1 = \dot{A}_2 = 1, k = 1/3$ ) и нормированные симметричные составляющие [Л. 8] ( $\dot{A}_0 = \dot{A}_1 = \dot{A}_2 = \sqrt{3}, k = 1$ ). Это простейшие и наиболее удобные решения. К реальным составляющим относятся составляющие  $x, y, z$  Кимбарка [Л. 9] ( $A = B = 1, c = -1, k = 2/3$ ), нормированные составляющие  $\alpha, \beta, 0$  [Л. 8] ( $A = \sqrt{3}, B = \sqrt{3}/2, c = k = 1$ ) модифицированные составляющие  $\alpha, \beta, 0$  [Л. 10] ( $A = 1, B = 1/2, c = \sqrt{3}, k = 1$ ) и др.

Автором предложена система реальных составляющих  $\alpha, \beta, \gamma$  ( $A = 2, B = 1, c = 1, k = 2/3$ ) со следующими матрицами преобразований:

$$m = \begin{bmatrix} 1/2 & 1 & 0 \\ 1/2 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}; \quad n = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}.$$

**Схемы замещения.** Чтобы схемы замещения для отдельных составляющих имели между собой связи только в местах, соответствующих несимметрии сети, матрицы сопротивлений должны быть диагональными.

Матрицу сопротивлений для обобщенных симметричных составляющих можно найти из выражений (4), (11) и (14):

$$Z_{occ} = \begin{bmatrix} Z_p & 0 & 0 \\ 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & Z_r \end{bmatrix} = \frac{1}{3k} \begin{bmatrix} A_0^2 Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & A_1^2 Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & A_2^2 Z_2 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где  $Z_0, Z_1, Z_2$  — сопротивления нулевой, прямой и обратной последовательностей:

$$\begin{aligned} Z_0 &= Z_a + Z_b + Z_c; \\ Z_1 &= Z_a + a^2 Z_b + a Z_c; \\ Z_2 &= Z_a + a Z_b + a^2 Z_c. \end{aligned} \quad (19)$$

Из выражений (5), (6) и (14) получаем для обобщенных симметричных составляющих следующую матрицу э. д. с.:

$$E_{occ} = \begin{bmatrix} \dot{E}_p \\ \dot{E}_q \\ \dot{E}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ A_1 \dot{E} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Таким образом, схемы замещения для обобщенных и обычно применяемых симметричных составляющих мало отличаются между собой.

Матрицу сопротивлений для реальных составляющих находим из выражений (3), (11), (17) и (19):

$$Z_{pc} = \begin{bmatrix} Z_p & 0 & 0 \\ 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & Z_r \end{bmatrix} = \frac{1}{3k} \begin{bmatrix} A^2 Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 2B^2 Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 2c^2 B^2 Z_1 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Отметим, что в данном случае  $Z_q = Z_r$ , если  $c=1$ .

Из выражений (18) и (21) видно, что для обобщенных симметричных и реальных составляющих сопротивления в схемах замещения пропорциональны сопротивлениям в соответствующих схемах для симметричных составляющих.

Матрицу э. д. с. для реальных составляющих получаем из выражений (5), (6) и (17):

$$\mathbf{E}_{pc} = \begin{bmatrix} \dot{E}_p \\ \dot{E}_q \\ \dot{E}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -B\dot{E} \\ -jcB\dot{E} \end{bmatrix} (\dot{E}_r = -jc\dot{E}_q). \quad (22)$$

Таким образом, в данном случае, в отличие от обобщенных симметричных составляющих, э. д. с. входят как в схему  $q$ -составляющих, так и в схему  $r$ -составляющих. При этом вторые отстают на  $90^\circ$  относительно первых.

Для некоторых систем реальных составляющих выражения (21) и (22) принимают простой вид. Так, например, для составляющих  $\alpha, \beta, \gamma$  получим:

$$Z_\alpha = Z_\beta = Z_1; \quad Z_\gamma = 2Z_0;$$

$$\dot{E}_\alpha = \dot{E}; \quad \dot{E}_\beta = -j\dot{E}; \quad E_\gamma = 0.$$

**Границные условия и комплексные схемы замещения.** Общий случай поперечной несимметрии показан на рис. 1. Матрица сопротивлений этой схемы следующая [Л. 10]:

$$Z_{\Phi K} = \begin{bmatrix} Z_A + Z_0 & Z_0 & Z_0 \\ Z_0 & Z_B + Z_0 & Z_0 \\ Z_0 & Z_0 & Z_C + Z_0 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Здесь и ниже индекс «к» указывает на поперечную несимметрию (короткое замыкание). Напряжения и токи в месте несимметрии связаны граничными условиями

$$U_\Phi = Z_{\Phi K} I_\Phi. \quad (24)$$

Имея в виду соотношения (11) и (12), получим:

$$U_c = Z_{ck} I_c = \hat{n} k Z_{\Phi K} n I_c. \quad (25)$$

Уравнению (25) соответствует комплексная схема замещения [Л. 7], показанная на рис. 2. Значения  $n$  для обобщенных симметричных и реальных составляющих даются матрицами (14) и (17).

Продольная несимметрия является аналогом поперечной [Л. 11] и поэтому в статье не рассматривается.

Границные условия и комплексные схемы замещения для частных случаев различных коротких замыканий и разрывов фаз можно получить из выражения (25) и рис. 2. Легче, однако, найти их

Общие симметричные составляющие

Таблица 1

Поврежде- ние			Границные условия	Комплексная схема замещения
	Короткое замыка- ние	Разрыв		
AO	B,C		$\frac{\dot{U}_p}{A_0} + \frac{\dot{U}_q}{A_1} + \frac{\dot{U}_r}{A_2} = 0$ $\hat{A}_0 I_p = \hat{A}_1 I_q = \hat{A}_2 I_r$	
BO	C,A		$\frac{\dot{U}_p}{A_0} + a^2 \frac{\dot{U}_q}{A_1} + a \frac{\dot{U}_r}{A_2} = 0$ $\hat{A}_0 I_p = a^2 \hat{A}_1 I_q = a \hat{A}_2 I_r$	
CO	A,B		$\frac{\dot{U}_p}{A_0} + a \frac{\dot{U}_q}{A_1} + a^2 \frac{\dot{U}_r}{A_2} = 0$ $\hat{A}_0 I_p = a \hat{A}_1 I_q = a^2 \hat{A}_2 I_r$	
BCO	A		$\frac{\dot{U}_p}{A_0} = \frac{\dot{U}_q}{A_1} = \frac{\dot{U}_r}{A_2}$ $\hat{A}_0 I_p + \hat{A}_1 I_q + \hat{A}_2 I_r = 0$	
CAO	B		$\frac{\dot{U}_p}{A_0} = a^2 \frac{\dot{U}_q}{A_1} = a \frac{\dot{U}_r}{A_2}$ $\hat{A}_0 I_p + a^2 \hat{A}_1 I_q + a \hat{A}_2 I_r = 0$	
ABO	C		$\frac{\dot{U}_p}{A_0} = a \frac{\dot{U}_q}{A_1} = a^2 \frac{\dot{U}_r}{A_2}$ $\hat{A}_0 I_p + a \hat{A}_1 I_q + a^2 \hat{A}_2 I_r = 0$	
BC	—		$\frac{\dot{U}_q}{A_1} = \frac{\dot{U}_r}{A_2}$ $\hat{A}_1 I_q + \hat{A}_2 I_r = 0$	

Продолжение табл. 1

Повреждение	Границные условия	Комплексная схема замещения
Короткое замыкание	Разрыв	
CA	$\frac{\dot{U}_q}{\dot{A}_1} = a^2 \frac{\dot{U}_r}{\dot{A}}$ $\hat{A}_1 I_q + a^2 \hat{A}_2 I_r = 0 \quad I_p = 0$	
AB	$\frac{\dot{U}_q}{\dot{A}_1} = a \frac{\dot{U}_r}{\dot{A}_2}$ $\hat{A}_1 I_q + a \hat{A}_2 I_r = 0 \quad I_p = 0$	

непосредственно из соответствующих граничных условий для фазных величин, используя матрицы составляющих (8). Граничные условия и комплексные схемы замещения для обобщенных симметричных составляющих систематизированы в табл. 1, а для реальных составляющих — в табл. 2. При трехфазных замыканиях граничные условия и комплексные схемы замещения одинаковы для всех видов составляющих и приведены отдельно в табл. 3. При составлении табл. 1, 2, 3 считалось, что переходные сопротивления добавлены к соответствующим сопротивлениям схемы замещения.

Отметим некоторые особенности табл. 1, 2, 3:

а) двухфазные короткие замыкания и разрывы одной фазы всегда характеризуются параллельным соединением схем замещения для отдельных составляющих, а однофазные короткие замыкания и разрывы двух фаз — их последовательным соединением;

б) промежуточные идеальные трансформаторы имеют действительный коэффициент трансформации только в случае применения реальных составляющих (см. также рис. 2).

Отметим, что уравнения и схемы, приведенные в табл. 2, в частных случаях существенно упрощаются. Так, например, при составляющих  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  в комплексные схемы замещения входят трансформаторы, имеющие отношения витков только  $1:1$ ,  $1:2$  и  $1:\sqrt{3}$ .

**Трансформирование составляющих.** В ряде случаев необходимо знать, как передаются составляющие через трехфазные трансформаторы. Рассмотрим для общности трансформатор произвольной группы  $N$  с коэффициентом трансформации  $1:1$ . Обозначим одним штрихом величины, относящиеся к первичной стороне трансформатора, а двумя штрихами — ко вторичной. В этом случае обычные симметричные составляющие на двух сторонах трансформатора связаны соотношениями

$$U'_{cc} = p_u U''_{cc}, \quad I'_{cc} = p_i I''_{cc}, \quad (26)$$

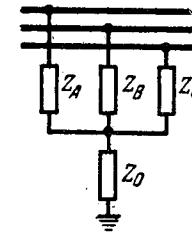


Рис. 1.

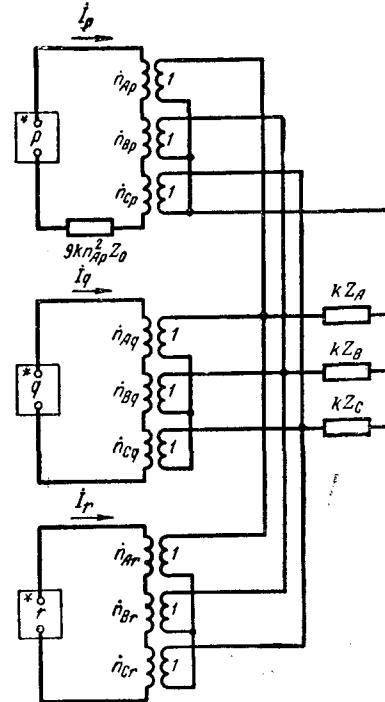


Рис. 2.

где

$$p = \begin{bmatrix} p_0 & 0 & 0 \\ 0 & p_1 & 0 \\ 0 & 0 & p_2 \end{bmatrix}, \quad (27)$$

причем

$$\hat{p}_1 = \hat{p}_2 = e^{jN \frac{\pi}{6}};$$

$p_0 = j^N$  и имеет смысл только для трансформаторов  $Y/Y_0$ .

Имея в виду матрицу (14a), можно получить эти соотношения для общего случая произвольных составляющих:

$$U'_{cc} = p_u U''_{cc}, \quad (28)$$

$$I'_{cc} = p_i I''_{cc},$$

где

$$p_u = m^{-1} l p l^{-1} m, \quad p_i = n^{-1} l p l^{-1} n. \quad (29)$$

Подставляя в (29) значения (14), (14a) и (27), находим для обобщенных симметричных составляющих:

$$p_{u \text{ осс}} = p_{i \text{ осс}} = p,$$

т. е. они трансформируются так же, как и обычные симметричные составляющие.

Таблица 2

Продолжение табл. 2

## Реальные составляющие

Повреждение		Границные условия	Комплексная схема замещения
Короткое замыкание	Разрыв		
<i>AO</i>	<i>B,C</i>	$\frac{B^2}{A} \dot{U}_p + B_r \dot{U}_q +$ $+ \frac{1}{c} B_i \dot{U}_r = 0$ $\frac{A}{B^2} I_p = \frac{1}{B_r} I_q =$ $= \frac{c}{B_i} I_r$	
<i>BO</i>	<i>C,A</i>	$-2 \frac{B^2}{A} \dot{U}_p +$ $+ (B_r + \sqrt{3} B_i) \dot{U}_q +$ $+ \frac{1}{c} (B_i -$ $- \sqrt{3} B_r) \dot{U}_r = 0$ $- \frac{1}{2} \frac{A}{B^2} I_p =$ $= \frac{1}{B_r + \sqrt{3} B_i} I_q =$ $= \frac{c}{B_i - \sqrt{3} B_r} I_r$	
<i>CO</i>	<i>A,B</i>	$-2 \frac{B^2}{A} \dot{U}_p + (B_r -$ $- \sqrt{3} B_i) \dot{U}_q + \frac{1}{c} (B_i +$ $+ \sqrt{3} B_r) \dot{U}_r = 0$ $- \frac{1}{2} \frac{A}{B^2} I_p =$ $= \frac{1}{B_r - \sqrt{3} B_i} I_q =$ $= \frac{c}{B_i + \sqrt{3} B_r} I_r$	
<i>BCO</i>	<i>A</i>	$\frac{2}{A} \dot{U}_p = \frac{1}{B_r} \dot{U}_q =$ $= \frac{1}{cB_i} \dot{U}_r$ $\frac{A}{2} I_p + B_r I_q +$ $+ cB_i I_r = 0$	

Повреждение		Границные условия	Комплексная схема замещения
Короткое замыкание	Разрыв		
<i>AO</i>	<i>B</i>	$-\frac{1}{A} \dot{U}_p =$ $= \frac{1}{B_r + \sqrt{3} B_i} \dot{U}_q =$ $= \frac{1}{c(B_i - \sqrt{3} B_r)} \dot{U}_r$ $- A I_p + (B_r +$ $+ \sqrt{3} B_i) I_q + c(B_i -$ $- \sqrt{3} B_r) I_r = 0$	
<i>ABO</i>	<i>C</i>	$-\frac{1}{A} \dot{U}_p =$ $= \frac{1}{B_r - \sqrt{3} B_i} \dot{U}_q =$ $= \frac{1}{c(B_i + \sqrt{3} B_r)} \dot{U}_r$ $- A I_p + (B_r -$ $- \sqrt{3} B_i) I_q + c(B_i +$ $+ \sqrt{3} B_r) I_r = 0$	
<i>BC</i>	—	$\frac{1}{B_r} \dot{U}_q = \frac{1}{cB_i} \dot{U}_r$ $B_r I_q + cB_i I_r = 0$ $I_p = 0$	
<i>CA</i>	—	$\frac{1}{B_r + \sqrt{3} B_i} \dot{U}_q =$ $= \frac{1}{c(B_i - \sqrt{3} B_r)} \dot{U}_r$ $(B_r + \sqrt{3} B_i) I_q +$ $+ c(B_i - \sqrt{3} B_r) I_r = 0$ $I_p = 0$	
<i>AB</i>	—	$\frac{1}{B_r - \sqrt{3} B_i} \dot{U}_q =$ $= \frac{1}{c(B_i + \sqrt{3} B_r)} \dot{U}_r$ $(B_r - \sqrt{3} B_i) I_q +$ $+ c(B_i +$ $+ \sqrt{3} B_r) I_r = 0$ $I_p = 0$	

Трехфазные повреждения

Повреждение		Границные условия	Комплексная схема замещения
Короткое замыкание	Разрыв		
Нет	$A_1B_1C$	$I_p = I_q = I_r = 0$	
$ABC\bar{O}$	Нет	$U_p = U_q = U_r = 0$	
$\bar{A}BC$	—	$U_q = U_r = 0$ $I_p = 0$	

Соотношения для трансформирования реальных составляющих получаем из (29), (17), (14a) и (27):

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{u \text{ pc}} &= \begin{bmatrix} p_0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}(\dot{p}_1 + \dot{p}_2) & j \frac{1}{2c}(\dot{p}_1 - \dot{p}_2) \\ 0 & -j \frac{c}{2}(\dot{p}_1 - \dot{p}_2) & \frac{1}{2}(\dot{p}_1 + \dot{p}_2) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} p_0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos N \frac{\pi}{6} & -\frac{1}{c} \sin N \frac{\pi}{6} \\ 0 & c \sin N \frac{\pi}{6} & \cos N \frac{\pi}{6} \end{bmatrix}; \quad (31) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{i \text{ pc}} &= \begin{bmatrix} p_0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}(\dot{p}_1 + \dot{p}_2) & j \frac{c}{2}(\dot{p}_1 - \dot{p}_2) \\ 0 & -j \frac{1}{2c}(\dot{p}_1 - \dot{p}_2) & \frac{1}{2}(\dot{p}_1 + \dot{p}_2) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} p_0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos N \frac{\pi}{6} & -\sin N \frac{\pi}{6} \\ 0 & \frac{1}{2} \sin N \frac{\pi}{6} & \cos N \frac{\pi}{6} \end{bmatrix}. \quad (32) \end{aligned}$$

Если  $c = \pm 1$ , то  $\mathbf{p}_{u \text{ pc}} = \mathbf{p}_{i \text{ pc}}$ .

Заметим, что достаточно рассмотреть только четыре способа соединения обмоток трехфазных трансформаторов, соответствующие группам 3, 6, 9, 12. Все остальные группы можно получить из этих только изменением обозначений фаз второй стороны трансформатора. Поэтому, не теряя общности, можно ограничиться рассмотрением только четырех указанных групп.

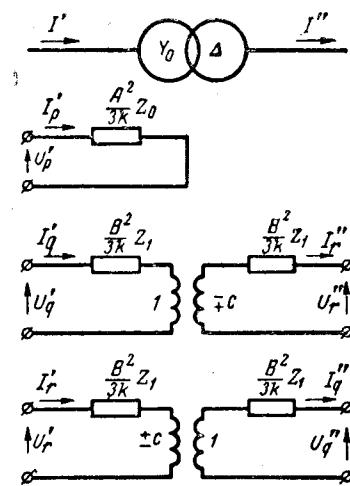


Рис. 3.

Для трансформаторов Y/Y (группы 6 и 12) выражения (27), (31) и (32) принимают простой вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{u \text{ occ}} &= \mathbf{p}_{i \text{ occ}} = \mathbf{p}_{u \text{ pc}} = \mathbf{p}_{i \text{ pc}} = \mathbf{p} = \\ &= \begin{bmatrix} \pm 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \\ 0 & 0 & \pm 1 \end{bmatrix}. \quad (30a) \end{aligned}$$

Здесь верхние знаки соответствуют группе 12, а нижние — группе 6. Как было сказано выше, значение  $p_0 = \pm 1$  имеет смысл только при заземленной нулевой точке трансформатора.

Для трансформаторов Y/Δ (группы 3 и 9) получаем:

$$\mathbf{p}_{u \text{ occ}} = \mathbf{p}_{i \text{ occ}} = \mathbf{p} = \begin{bmatrix} * & 0 & 0 \\ 0 & \pm j & 0 \\ 0 & 0 & \pm j \end{bmatrix}; \quad (30b)$$

$$\mathbf{p}_{u \text{ pc}} = \begin{bmatrix} * & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm \frac{1}{c} \\ 0 & \pm c & 0 \end{bmatrix}; \quad (31b)$$

$$\mathbf{p}_{i \text{ pc}} = \begin{bmatrix} * & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mp c \\ 0 & \pm \frac{1}{c} & 0 \end{bmatrix}, \quad (32b)$$

где верхние знаки относятся к группе 3, а нижние — к группе 9. Вместо  $p_0$  поставлена звездочка, показывающая, что для этих трансформаторов  $p_0$  лишиено смысла.

Обратим внимание, что при  $c = \pm 1$  трансформаторы Y/Δ обусловливают только смену мест реальных составляющих  $q$  и  $r$  с изменением знака одной из них.

Преобразования, определяемые матрицами (30a), (31b), (32b), могут быть легко осуществлены на расчетной модели при помощи трансформаторов с действительными коэффициентами трансформации, т. е. реальные составляющие дают возможность моделировать сдвиги фаз, обусловленные

трехфазными силовыми трансформаторами. В качестве примера на рис. 3 показана полная схема замещения трансформатора  $Y_0/\Delta$  [см. выражения (21), (31б), (32б)]. Если при составлении схем замещения для отдельных составляющих трансформаторы учитывать этим способом, то граничные условия и комплексные схемы замещения, приведенные в табл. 1 и 2, можно применять одновременно для нескольких повреждений, даже если между ними находятся трансформаторы. Применение такого вида схемы замещения трансформатора дает, кроме того, возможность в собранной на расчетном столе комплексной схеме замещения измерять непосредственно все величины с обеих сторон трансформаторов.

**Заключение.** 1. Обобщенные симметричные составляющие и их основной частный случай — обычные симметричные составляющие — дают возможность привести к диагональному виду матрицы сопротивлений всех элементов сети и они могут быть применены для любых схем. Их основной недостаток заключается в том, что матрицы преобразования содержат комплексные члены, что затрудняет моделирование сложных несимметричных режимов.

2. Реальные составляющие приводят к диагональному виду матрицы сопротивлений только тех элементов, для которых  $Z_1 = Z_2$ , и поэтому их целесообразно применять только в тех случаях, когда возможно принять  $Z_1 = Z_2$  для всех элементов сети. Все члены матриц преобразования реальных составляющих являются действительными числами, из чего вытекают следующие преимущества:

а) реальные составляющие дают возможность моделировать сложные несимметричные режимы при помощи промежуточных трансформаторов, коэффициенты трансформации которых выражаются действительными числами;

б) при помощи реальных составляющих в схемах замещения можно учитывать не только сопротивления трехфазных силовых трансформаторов, но и определяемые ими сдвиги фаз;

в) при особых группах трансформаторов с действительными коэффициентами трансформации возможно измерять фазные величины в комплексной схеме замещения и применять ее для непосредственного исследования многих устройств релейной защиты и автоматики.

### Литература

1. E delmann H., Über die Anwendung von Übertragermatrizen in Untersuchungen auf dem Netzmodell, AEU, Bd 11, 1957.
2. Фабрикант В. Л., Применение симметричных и других составляющих к расчету несимметричных режимов трехфазных систем, Ученые записки Рижского политехнического института, вып. 4, 1963, т. IX.
3. Calvaeg A., Théorie des réseaux en quadrature antisymétriquement couplés et applications à l'électrotechnique, Bull. scient. de l'Association des ingénieurs-electriciens sortis de l'Institut électrotechnique Montefiore (Liège — Belgique), 1957, mai.
4. Carlin H. J., On the physical realisability of linear nonreciprocal networks, Proc. Inst. Radio Eng., v. 43, 1955.
5. Hans H. A., Equivalent circuit for a passive nonreciprocal network, J. Appl. Phys., v. 25, 1954.
6. E delmann H., Ein Übertrager mit komplexem Übersetzungsverhältnis, Frequenz, Bd 11, 1957.
7. Петков Л., Възможности за изследване на несиметричните режими в електрическите системи, Известия на Института по енергетика при БАН, т. 1, София, 1961.
8. E delmann H., Normierte Komponentensysteme zur Behandlung von Unsymmetrieaufgaben in Drehstrom- und Zweiphasennetzen, Archiv für Elektrotechnik, Bd 42, 1956.
9. Kimbark W., Two-phase coordinates of a three phase circuit, Trans. AIEE, v. 58, 1939.
10. Hsiao T., Fault analysis by modified  $\alpha$ ,  $\beta$ , 0 components, Power Appar. and Syst., 1962, VI.
11. Атабеков Г. И., Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей, Госэнергоиздат, 1957.

[12.8.1963]



### К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

4-я Всесоюзная конференция по автоматизированному электроприводу будет проводиться в IV квартале 1964 г. О месте и дате конференции будет сообщено дополнительно.

# Из опыта работы

УДК 681.142.2:621.313.1

## Расчет установившегося режима системы синхронный генератор — асинхронный электродвигатель на математической машине непрерывного действия

Л. Е. ШЕЙНМАН

Севастополь

В силу сложных взаимосвязей между напряжением, током нагрузки, скольжением и моментом сопротивления на валу АД расчет установившихся режимов, казалось бы, простейшей системы СГ—АД практически оказывается громоздким.

Задача упрощается, если для расчетов использовать математическую машину непрерывного действия.

В качестве исходных используем уравнения равновесия э. д. с. в установившемся режиме для рассматриваемой системы (в относительных единицах) при неизменной скорости вращения СГ<sup>1</sup>

$$\left. \begin{aligned} & (r_{sc} + r_{sa}) i_{ds} - (x_{gc} + x_1 + x_m) i_{gs} - x_m i_{gr} = 0; \\ & (x_{dc} + x_1 + x_m) i_{ds} + (r_{sc} + r_{sa}) i_{gs} + x_m i_{dr} = -e_d; \\ & -x_m i_{gs} \cdot S + r'_2 i_{dr} - (x'_2 + x_m) i_{gr} \cdot S = 0; \\ & x_m i_{ds} S + (x'_2 + x_m) i_{dr} S + r'_2 i_{gr} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $e_d$  — э. д. с. обмотки статора генератора по продольной оси;

$i_{ds}$ ,  $i_{gs}$  — токи обмотки статора по продольной и по перечной осям;

$i_{dr}$ ,  $i_{gr}$  — токи обмотки ротора асинхронного электродвигателя по продольной и поперечной осям;

$r_{sc}$ ,  $r_{sa}$  — активные сопротивления фаз обмоток статоров генератора и электродвигателя;

$x_{dc}$ ,  $x_{gc}$  — синхронные реактивные сопротивления генератора по продольной и поперечной осям;

$x_1$ ,  $x'_2$  — реактивные сопротивления фаз статора и ротора электродвигателя;

$x_m$  — реактивное сопротивление взаимоиндукции электродвигателя;

$r'_2$  — активное сопротивление фазы обмотки ротора электродвигателя;

$S$  — скольжение АД.

Число неизвестных в приведенной системе ( $i_{ds}$ ,  $i_{gs}$ ,  $i_{dr}$ ,  $i_{gr}$ ,  $S$ ) превышает число уравнений. Поэтому

<sup>1</sup> Кожин В. А., Система генератор — двигатель переменного тока при изменении частоты и тока возбуждения генератора. Труды ВВМИОЛУ им. Ф. Э. Дзержинского, 1957, № 16.

мы дополнительны вводим уравнение равновесия моментов:

$$x_m (i_{dr} i_{gs} - i_{gr} i_{ds}) = f(S), \quad (2)$$

где  $f(S)$  — функция, определяющая связь между скольжением и моментом сопротивления АД.

Система уравнений (1) и (2) может быть решена на математической машине непрерывного действия по структурной схеме (рис. 1). Если исследователь располагает ограниченными техническими средствами (нет специального функционального преобразователя для воспроизведения функции  $f(S)$ , не хватает блоков умножения), структурная схема может быть упрощена (рис. 2). В этом случае следует произвести поиск такого значения  $S$ , при котором полученные на машине токи  $i_{ds}$ ,  $i_{gs}$ ,  $i_{dr}$ ,  $i_{gr}$  удовлетворяют равенству (2), что будет искомым установившимся режимом.

**Пример.** Рассчитать токи и скольжение АД при питании от СГ, если параметры машин следующие:

$$r_{sc} = 0,0119, \quad r_{sa} = 0,0046, \quad x'_2 = 0,03,$$

$$x_{dc} = 1,798, \quad r'_2 = 0,012, \quad x_m = 1,0$$

$$x_{gc} = 0,915, \quad x_1 = 0,07,$$

$$e_d = 4,37,$$

$$f(S) = \frac{1,61}{(1-S)^2}.$$

Исходные уравнения

$$\left. \begin{aligned} & 0,0165 i_{ds} - 1,985 i_{gs} - i_{gr} = 0; \\ & 2,868 i_{ds} + 0,0165 i_{gs} + i_{gr} = -4,37; \\ & -S \cdot i_{gs} + 0,012 i_{dr} - 1,039 S i_{dr} = 0; \\ & S \cdot i_{ds} + 1,039 S i_{dr} + 0,012 i_{gr} = 0; \\ & i_{dr} \cdot i_{gs} - i_{gr} \cdot i_{ds} = \frac{1,61}{(1-S)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Первые четыре уравнения приводим к удобному виду для ввода в математическую машину:

$$-i_{gs} = 0,503 i_{gr} - 0,008 i_{ds};$$

$$-i_{ds} = 0,006 i_{gs} + 0,35 i_{dr} + 1,524;$$

$$-i_{gr} = 0,963 i_{gs} - 0,0115 \frac{1}{S} i_{dr};$$

$$-i_{dr} = 0,0115 \frac{1}{S} i_{gr} + 0,963 i_{ds}.$$

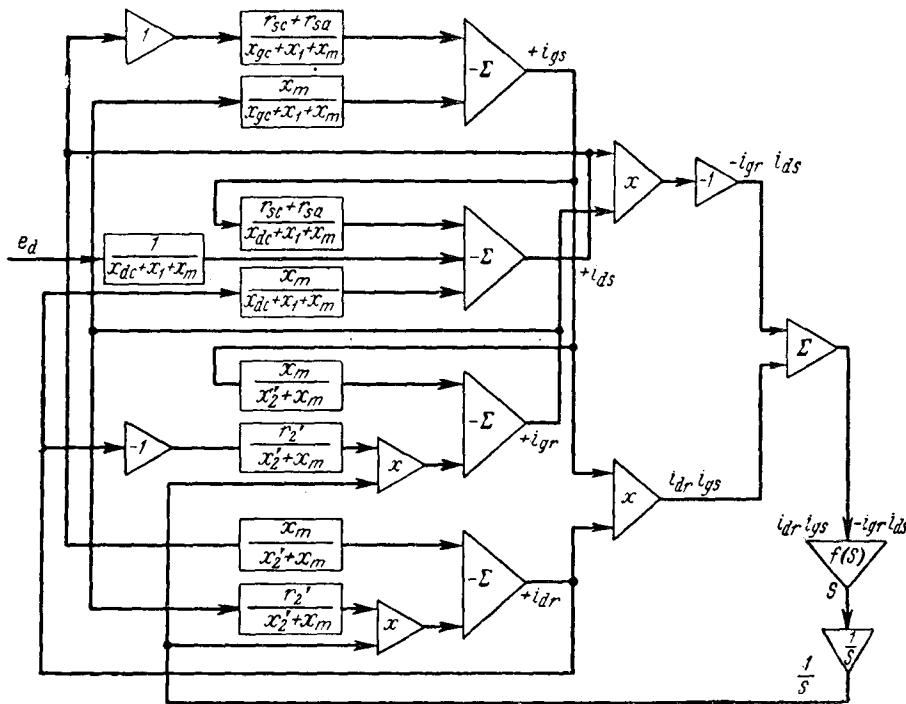


Рис. 1. Структурная схема решения задачи.

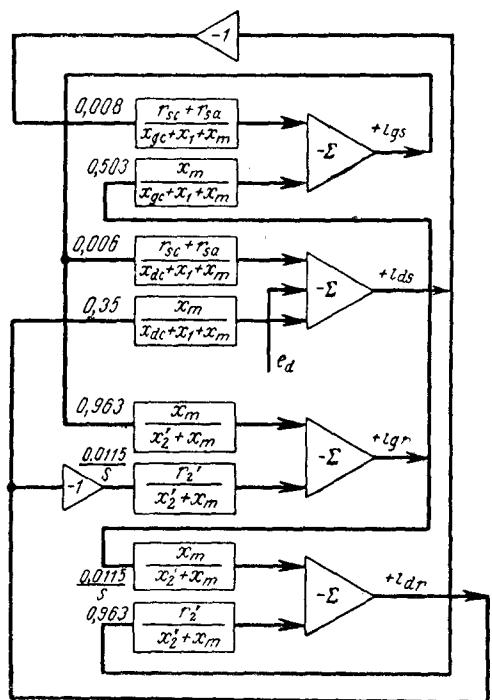


Рис. 2. Структурная схема для поиска.

В структурную схему (рис. 2) подставляем полученные данные. Поиск — решение по этой схеме и последнему уравнению в системе (3) показывает, что установившийся режим будет иметь место при скольжении

$$S = 0,028.$$

При этом составляющие тока равны:

$$i_{ds} = -2,1; i_{gs} = -0,64; i_{dr} = 1,51; i_{gr} = 1,25.$$

**Вывод.** Расчет установившихся режимов в системе СГ—АД существенно упрощается в случае использования математической машины непрерывного действия.

[22. 10. 1963]

◇ ◇ ◇

## Дискуссии

УДК 621.31

### ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ НАИВЫГОДНЕЙШЕГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ

(Статья В. М. Горнштейна, «Электричество», 1961, № 8)

#### ОТВЕТ АВТОРА

Моя статья в журнале «Электричество» [Л. 1] вызвала отклики [Л. 2—6]. В некоторых из них мои возражения против ряда работ, в особенности В. С. Шаханова, неправильно истолковываются как возражения против уточненных методов, применение которых стало возможно благодаря внедрению вычислительных машин, и как призыв возвратиться к расчетам вручную [Л. 2 и 4].

На самом же деле мои возражения касались явно ошибочных положений, лежащих в основе разрабатываемых работ и делающих практическое применение их безусловно недопустимым ни при ручном, ни при машинном счете. В настоящее время эти положения освещены значительно полнее, чем к моменту написания статьи [Л. 1], что позволяет разобрать их подробнее.

**Учет потерь активной мощности в сети.** Условие оптимального режима энергосистемы с учетом потерь активной мощности в сети имеет, как известно, следующий вид:

$$\frac{b_1}{1-\sigma_1} = \dots = \frac{b_i}{1-\sigma_i} = \dots = b_o, \quad (1)$$

где  $b_i$  — относительный прирост расхода условного топлива или издержек для соответствующих станций;

$\sigma_i = \frac{\partial \pi}{\partial P_i}$  (в обозначениях В. С. Шаханова  $\frac{\partial P_L}{\partial P_i}$ ) — частная производная (относительный прирост) потерь активной мощности  $\pi$  по нагрузке  $i$ -й станции.

Точность расчета оптимального режима существенно зависит от точности вычисления величин  $\sigma_i$ . В. С. Шаханов предусматривает следующий порядок их расчета [Л. 7]:

а) исходный режим (нулевое приближение) находят, полагая в формуле (1) все  $\sigma_i$  равными нулю (т. е. без учета потерь), или принимая их по данным предыдущего расчета;

б) давая нагрузкам всех станций поочередно малые приращения, определяют методом, описанным в [Л. 7], значения  $\sigma_i$  для всех станций;

в) подставляя найденные значения  $\sigma_i$  в формулу (1), рассчитывают новые значения нагрузок станций уже с учетом потерь (режим первого приближения); по этому режиму вновь рассчитывают численные значения  $\sigma_i$ , которые и принимаются за окончательные.

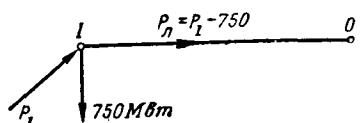
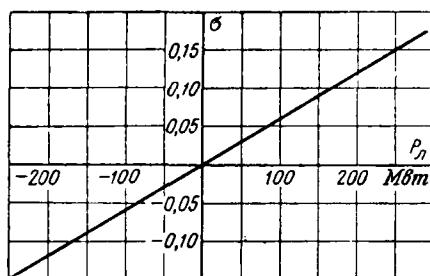
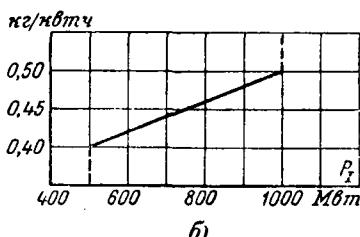


Рис. 1. Схема группы станций, работающих на систему бесконечной мощности.



a)



б)

Рис. 2. Характеристики относительных приростов потерь для линии электропередачи (a) и расхода условного топлива группой станций (б).

Однако, если найденные значения  $\sigma_i$  вновь подставить в формулу (1), то распределение нагрузок снова изменится. Таким образом, имеет место итерационный процесс, который В. С. Шаханов просто обрывает после 1-й итерации, даже не проеконтролировав его сходимость (имеющиеся в [Л. 6 и 7] указания о контроле относятся к сходимости итераций при расчете потокораспределения, при выборе множителей, определяющих режим гидростанций и т. п., но не имеют отношения к рассматриваемому процессу).

Вместе с тем можно показать, что при часто встречающихся на практике условиях такой итерационный процесс вообще не сходится. Это можно проиллюстрировать простейшим примером, показанным на рис. 1, где представлена схема работы группы электростанций через линию электропередачи на энергосистему бесконечной мощности. Характеристики относительных приростов для группы станций и линии электропередачи представлены на рис. 2.

Непрудно показать, что при относительном приросте энергосистемы  $b_0=0,48$  наивыгоднейший режим рассматриваемой схемы определяется следующими данными:  $P_1=810 \text{ Mwt}$ ,  $P_{\pi}=60 \text{ Mwt}$ ,  $b_1=0,462$ ,  $\sigma=0,036$ . Действительно, при этом условие (1) выполняется, так как  $\frac{0,462}{1-0,036}=0,480$ .

Если, следуя предложению В. С. Шаханова, произвести расчет при  $\sigma=0$ , то режим определяется строкой «0» таблицы. Определяя по нагрузке  $P_{\pi}$  (столбец 4) значение  $\sigma$  и производя новый расчет режима при этом значении  $\sigma$ , получим строку 1 и т. д. Графически результаты расчета представлены на рис. 3. Как видно из этого рисунка, в данном случае процесс итераций не сходится. Значение  $\sigma=-0,042$  (строка 2), полученное при обрыве процесса после 1-й итерации (способ В. С. Шаханова) отличается от значения, которое соответствует оптимальному режиму ( $\sigma=0,036$ ) даже знаком.

Если по этому значению  $\sigma$  рассчитать распределение нагрузки между станциями, то получим  $P_1=1000 \text{ Mwt}$  (строка 2). Эта нагрузка еще дальше от оптимального режима ( $810 \text{ Mwt}$ ), чем значение, найденное без учета потерь ( $900 \text{ Mwt}$ ). Таким образом, в данном случае учет потерь предлагаемым способом дает еще худшие результаты, чем полный неучет потерь.

Случай расходящегося процесса простых итераций очень часты. Можно привести аналогичные примеры и для реальных систем с сетями любой сложности, включающими за-

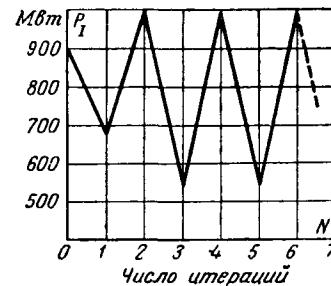


Рис. 3. Диаграмма процесса итераций.

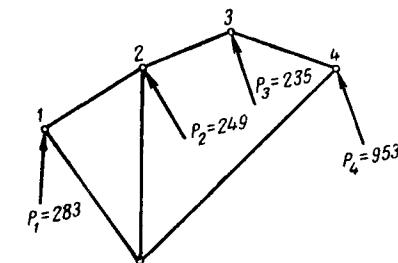


Рис. 4. Упрощенная схема системы (нагрузки потребителей не показаны).

Таблица

№ итерации	$\sigma$	$b_1=0,48(1-\sigma)$	$P_1$	$P_{\pi}=P_1-750$
0	0,000	0,480	900	150
1	0,090	0,436	680	-70
2	-0,042	0,500	1 000	250
3	0,150	0,408	540	-210
4	-0,126	0,540	1 000	250
5	0,150	0,405	540	-210

мкнутые контуры. Даже если процесс итераций сходится, обрыв его после первой итерации, как правило, кроме случаев, когда потерями вообще можно пренебречь, приводит к недопустимым погрешностям.

Предусмотренное в работах В. С. Шаханова использование заранее рассчитанных численных значений  $\sigma_i$  независимо от точности, с которой они вычислены, в соответствующие часы однотипных суток также неприемлемо. Даже в однотипные сутки и при одной и той же нагрузке энергосистемы значения  $\sigma_i$  могут сильно изменяться вследствие изменения нагрузок отдельных станций, например вследствие вывода в ремонт или из ремонта агрегатов. О размерах ошибок, вызываемых неучетом этих изменений, дает представление приведенный ниже пример.

Для объединенной системы, упрощенная схема которой представлена на рис. 4, зависимость относительного прироста потерь для станций (группы станций) № 2, 3 от нагрузок представлена следующими приближенными линеаризованными выражениями:

$$\sigma_2 = (0,0466P_1 + 0,1430P_2 + 0,0783P_3 + 0,00702P_4 - 74,9) \cdot 10^{-2},$$

$$\sigma_3 = (0,0236P_1 + 0,0783P_2 + 0,1900P_3 + 0,0195P_4 - 99,6) \cdot 10^{-2}.$$

Для нагрузок станций, представленных на рис. 4, это дает

$$\sigma_2 = -0,90 \cdot 10^{-2}, \quad \sigma_3 = -11,20 \cdot 10^{-2}.$$

В случае увеличения нагрузки станции № 2 на 50 Mwt получим:

$$\sigma_2 = +6,25 \cdot 10^{-2}, \quad \sigma_3 = -7,29 \cdot 10^{-2}.$$

Такое же увеличение нагрузки станции № 3 дает:

$$\sigma_2 = +3,01 \cdot 10^{-2}, \quad \sigma_3 = -1,70 \cdot 10^{-2}.$$

Следовательно, даже сравнительно небольшое изменение нагрузки станции может вызвать резкое изменение значений  $\sigma$  как для нее, так и для других станций.

Также не обоснован и предложенный в работах В. С. Шаханова способ пересчета значений  $\sigma$  на другие часы путем линейной интерполяции.

О дополнительных членах, учитывающих реактивную нагрузку, в формулах для учета потерь. В. С. Шаханов утверждает [Л. 2], будто используемые им «развернутые» выражения (8–10) в [Л. 7] и соответствующие им выражения [Л. 6] применимы в предположении отдельного распределения активной и реактивной мощности. Это неверно. Указанные выражения, т. е. формулы И. М. Марковича, имеют в наших обозначениях следующий вид:

$$\frac{b_i}{1 - \frac{\partial \pi}{\partial P_i} - \frac{\partial \pi}{\partial Q_i} \frac{\partial q / \partial P_i}{1 - \partial q / \partial Q_i}} = b_0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \pi / \partial Q_i}{1 - \partial q / \partial Q_i} = \text{пост.} \quad (3)$$

Если в балансирующем узле имеется регулируемый источник реактивной мощности, то для него  $\frac{\partial \pi}{\partial Q_i} = 0$ , так как потери в сети не зависят от нагрузки балансирующего узла. Поэтому условие (3) оптимального распределения реактивных мощностей принимает следующий вид:

$$\frac{\partial \pi}{\partial Q_i} = 0 \text{ или } \sigma_{aP_i} = 0. \quad (3a)$$

Одновременно третий член знаменателя формулы (1) обращается в нуль и формула (1) принимает следующий вид:

$$\frac{b_i}{1 - \frac{\partial \pi}{\partial P_i}} = b_0 \text{ или } \frac{b_i}{1 - \sigma_{aa_i}} = b_0. \quad (2a)$$

Частные производные в формулах (2) и (3) вычисляются в предположении, что все переменные, кроме той, по которой производится дифференцирование, остаются неизменными. Наличие дополнительных членов в формулах (2) и (3) по сравнению с формулами (2a) и (3a) объясняется тем, что изменение активной нагрузки любой станции вызывает изменение потерь реактивной мощности. Если станции в балансирующем узле нет, это вызывает необходимость изменения реактивной нагрузки других станций и соответствующие дополнительные потери активной мощности.

Таким образом, формулы И. М. Марковича представляют собой условия оптимального режима при совместном, а не отдельном, как утверждает В. С. Шаханов, распределении активных и реактивных мощностей и при отсутствии (или постоянстве) реактивной мощности в балансирующем узле.

Методика В. С. Шаханова предусматривает после каждого изменения (вариации) нагрузки какой-либо станции полный расчет нормального режима со сведением баланса активных и реактивных мощностей. При этом учитываются все вынужденные изменения реактивных нагрузок станций (хотя и не по тому закону, который вытекает из требований экономичного распределения реактивных нагрузок). Учитывается и вызываемое этим приращение потерь активной мощности. Следовательно, подстановка найденных по методу В. С. Шаханова частных производных в формулы И. М. Марковича, предусматривающие другой порядок их вычисления, означает повторный учет уже учтенного обстоятельства. Кроме того (на это обратил внимание К. А. Смирнов), В. С. Шаханов всегда выбирает в качестве балансирующей точки «типа III», т. е. имеющую регулируемый источник реактивной мощности. При этом формулы И. М. Марковича вообще не имеют отношения к делу независимо от порядка вычисления частных производных.

**О выборе коэффициентов, определяющих расход воды гидростанциями.** В. С. Шаханов отводит приведенные в моей статье указания о недопустимости ежедневного изменения коэффициента  $\lambda$ , определяющего расход воды гидростанциями, мотивируя это тем [Л. 2], что «режимы различных дней не связаны общим изопериметрическим вариационным условием». В действительности же для гидростанций с крупными водохранилищами расход воды определяется из рассмотрения цикла регулирования, длительность которого в зависимости от ряда условий может составлять от нескольких дней до нескольких лет. Условие расходования в течение такого цикла заданного количества воды есть общее изопериметрическое условие, связывающее режимы различных дней. Также несостоит в том, что для рабочих и воскресных дней множитель  $\lambda$  приводит к увеличению колебаний нагрузки тепловых станций. Прежде всего, если автор считает необходимым для облегчения работы персонала и оборудования ТЭС отступить от наивыгоднейшего режима, то об этом следует прямо написать, а не выдавать такой режим за оптимальный. Однако в действительности сохранение одинаковых значений множителя  $\lambda$  для рабочих и нерабочих дней облегчает, а не утяжеляет режим работы ТЭС, так как при этом в дни с пониженнной нагрузкой системы снижается также нагрузка и расход воды на ГЭС. В результате нагрузка ТЭС повышается по сравнению с режимом, выбираемым исходя из условия постоянства среднесуточных расходов воды.

Поэтому, за исключением некоторых частных случаев (например, необходимости поддержания минимального выпуска воды для нужд судоходства в маловодные периоды), суточный режим следует выбирать, исходя из заданных значений  $\lambda$ , корректируемых не ежедневно, а в более длительные сроки. Выбор этих сроков определяется соображениями, рассмотрение которых выходит за рамки задач расчета суточного режима. Более подробно эти соображения рассмотрены в [Л. 18].

Об учете нестационарных режимов в бьефах ГЭС. В ответе на мои возражения против предложенного им метода учета нестационарных режимов в бьефах ГЭС В. С. Шаханов утверждает [Л. 2], будто рассматривать выражение (8) [Л. 1] как дополнительное условие к функционалу (5) нельзя. Это утверждение ни на чем не основано, так как указанное выражение определяет связь между переменными, входящими в подынтегральное выражение, которые из-за наличия этой связи перестают быть независимыми. То, что в математическое выражение этой связи входят производные, т. е. что она является неголономной, не освобождает от необходимости ее учета. Ссылка В. С. Шаханова на вариационные задачи с запаздывающим аргументом неуместна, так как такие задачи в рассматриваемых статьях ни им, ни мной не решались. Так же не обоснованы его ссылки на правила вариационного исчисления. Согласно этим правилам, неголономные связи учитываются именно тем способом, который применен мною в [Л. 1]. Ошибка В. С. Шаханова в том и состоит, что, вопреки правилам вариационного исчисления, он при составлении уравнений Эйлера не взял производной по одной из переменных, от которых зависит функционал (напор), и не учел ее связи с другими переменными (расход воды или нагрузка ГЭС).

Как следует из формулы (П.6в) [Л. 1]\*, при исправлении этой ошибки значение  $\lambda$  становится переменным и определяется сложным дифференциальным уравнением.

Более подробного рассмотрения заслуживает утверждение В. С. Шаханова, будто второй член числителя выражения (1.2) [Л. 6] или (9а) [Л. 2] должным образом учитывает нестационарные явления в нижнем бьефе. Чтобы показать ошибочность этого утверждения, разобъем, как это делает В. С. Шаханов, рассматриваемый режим на малые интервалы и допустим, что напор ГЭС в каждом интервале является функцией ее нагрузок в предыдущие интервалы. Вывод расчетных формул для такого представления процесса приведен в приложении (формула П.8). Сравнивая формулу (П.8) с формулой В. С. Шаханова (формула 1.2 в [Л. 6]), нетрудно убедиться, что числитель последней содержит лишь первые два члена, входящие в формулу (П.8). Члены с индексами  $j+1, \dots, n$ , относящиеся к интервалам, следующим за рассматриваемым, в формуле В. С. Шаханова отсутствуют. Это еще раз подтверждает, что в методе В. С. Шаханова учитывается только влияние предыдущего режима на напор и относительный прирост ГЭС, но не учитывается последействие изменений режима. Такой учет должен включаться именно в предвидении того обстоятельства, что изменение режима в данный момент повлечет изменение напора, а следовательно, и экономичности режима ГЭС и всей системы в дальнейшем. В моей методике это учитывается изменением множителя  $\lambda$  для ГЭС.

Как уже указывалось в [Л. 1], анализ формул и расчеты, произведенные по методике, описанной в [Л. 18], показали, что учет влияния колебаний напора на относительный прирост ГЭС без учета последействия, как это делает В. С. Шаханов, усложняя расчет, не приближает режим к оптимальному по сравнению с неучетом колебаний напора, а удаляет его от оптимального и потому неприемлем.

**О выборе наивыгоднейшего состава работающих агрегатов.** Наибольшие трудности при решении рассматриваемой задачи, как справедливо указывал и сам В. С. Шаханов [Л. 9], вызываются необходимостью выбирать наивыгоднейшее из огромного числа сочетаний, доходящего, например, при возможности остановить или пустить пять агрегатов из 100 до  $79 \cdot 10^6$ . Если допустить, что проверка каждого сочетания требует 1 сек, то для выбора оптимального потребовалось бы 2,5 года непрерывного машинного счета.

\* Л. З. Руминский обратил мое внимание, что в формуле (П.6в) в 3-й строке пропущен множитель 3 при 2-м члене, а в 4-й строке вместо множителя 2 следует подставить 3. Однако эти поправки не отражаются на выводе о непостоянстве  $\lambda$ , численные же расчеты производились мною по другой методике, описанной в [Л. 18].

Чтобы преодолеть это затруднение, В. С. Шаханов предложил определять расчетом только выгодность пуска агрегатов из числа находящихся в резерве, утверждая [Л. 9], будто при многократном применении такой методики «обеспечивается последовательное приближение к общему оптимальному сочетанию агрегатов...».

Как я уже указывал [Л. 10], это утверждение неверно, хотя бы потому, что при предлагаемой методике агрегат, который по каким-либо причинам не вошел в начальное сочетание остановленных агрегатов, не попадет в него и в дальнейшем независимо от выгодности этого. Таким образом, произвольный выбор начального сочетания по методике В. С. Шаханова предопределяется и дальнейший режим.

В своем ответе В. С. Шаханов обошел это замечание молчанием. Ко всеменным признанием его справедливости является имеющаяся в [Л. 11] ссылка на то, что для выбора начального сочетания «достаточно предположить, что вся система остановлена, а нагрузка системы увеличивается от нуля до полной». Но при этом задача снова сводится к необходимости сравнения десятков (а иногда и сотен) миллинов сочетаний. Как В. С. Шаханов сам отмечал в [Л. 9], это практически невыполнимо.

Указанную мною ошибку в основных расчетных формулах В. С. Шаханов пытается представить как малосущественную неточность, вызванную тем, что в статье «не указаны допущения, при которых справедлива формула...» [Л. 11]. С этой целью он пишет в [Л. 2 и 11] о нецелесообразности «с вычислительной точки зрения» использования для расчетов «предложенное В. М. Горишней аналитическое выражение». На самом деле речь идет не о моем предложении, а о заведомо непригодном для расчетов выражении (2) [Л. 10], получающемся из формул В. С. Шаханова, если, сохранив основу его методики, исправить допущенную ошибку, заключавшуюся в несоответствии постоянных членов пределам интегрирования. Именно поэтому В. С. Шаханов одновременно с исправлением этой ошибки предложил в [Л. 2, 11 и 12] совершенно новую методику. Однако, помимо уже отмеченной необходимости сравнения огромного числа сочетаний (в последней статье предлагается уже не выбирать наивыгоднейшее сочетание, а проверять целесообразность пуска или остановки заранее намеченных сочетаний), эта методика также отличается недопустимыми погрешностями.

В частности, ошибочно положенное в ее основу предположение о выгодности в первую очередь пускать сочетания агрегатов, для которых «срок окупаемости» пусковых расходов  $T_{\text{эк}}^*$  меньше [Л. 2, стр. 14]. Величина  $T_{\text{эк}}^*$  пригодна только для суждения о том, выгодно или невыгодно пустить данный агрегат на определенный срок, но непригодна для установления очередности пуска агрегатов (сочетания). Это можно проиллюстрировать приведенным ниже простейшим примером.

**Пример.** На период максимума нагрузки энергосистемы длительностью  $t=5$  ч можно пустить одно из двух сочетаний агрегатов, характеризующихся следующими данными:

пуск сочетания № 1 дает экономию топлива в системе  $B_{10}=4,0 \text{ т/ч}$ , расход топлива на пуск  $B_{\text{пуск}}=8,0 \text{ т}$ ;

пуск сочетания № 2 дает  $B_{20}=1,5 \text{ т/ч}$ ;  $B_{\text{пуск}}=1,5 \text{ т}$ . При этих условиях пуск сочетания № 1 дает экономию топлива:

$$B_0 = B_{10}t - B_{\text{пуск}} = 4,0 \cdot 5 - 8,0 = 12 \text{ т.}$$

Пуск сочетания № 2:

$$B_0 = 1,5 \cdot 5 - 1,5 = 6 \text{ т.}$$

Таким образом, выгодно пустить сочетание № 1. Однако по методике В. С. Шаханова было бы пущено сочетание № 2, так как для него «срок окупаемости»  $T_{\text{эк}}^* = \frac{1,5}{1,5} = 1,0 \text{ ч}$  меньше, чем для сочетания № 1 ( $T_{\text{эк}}^* = \frac{8,0}{4,0} = 2,0 \text{ ч}$ ).

Отмеченные дефекты, не говоря уже о других, останавливаются на которых не позволяет объем настоящей статьи, делают исправленную методику В. С. Шаханова столь же непригодной для практических расчетов, как и первоначальная. Пытаясь доказать, будто все существующие методы имеют не менее существенные дефекты, В. С. Шаханов делает ряд критических замечаний по методам, предложенным мною. Однако эти замечания необоснованы.

Например, в [Л. 2] В. С. Шаханов приписывает моей методике неучет потерь активной мощности в сети. В [Л. 11] он признает, что она предусматривает учет потерь введением множителя  $1-\sigma$  (т. е. тем же способом, который после меня

использовал и сам В. С. Шаханов), но утверждает, будто я предлагаю вводить этот множитель заранее, что исключает возможность учета изменений  $\sigma$  в течение суток. Но столь нерациональный способ я никогда не предлагал. В моих работах предусматривается заблаговременное построение только кривой зависимости экономии от остановки или пуска агрегатов от относительного прироста  $B'_{\text{a}}=f(b)$ . Поправка на потерю учитывается в ходе расчета оперативного режима путем определения величины  $b$  для каждой станции с учетом потерь по общизвестной формуле  $b = (1-\sigma)b_0$ . Можно показать, что таким путем потери учитываются вполне строго с той же точностью, с какой они учитываются при распределении нагрузки между станциями.

Также неправильно и то, будто в основу моей методики «положено принципиальное допущение о неизменности относительного прироста системы при пуске (остановке) агрегата». Такое допущение делается мною лишь при заблаговременном построении кривой  $B'_{\text{a}}=f(b)$ . Однако еще в [Л. 17] была показана и иллюстрирована числовыми примерами возможность внесения поправки на изменение относительного прироста системы  $B''_{\text{a}}$ . При расчетах на цифровых машинах это изменение можно учесть еще проще, например, определить две величины  $b$  — до и после остановки агрегата — и найти среднее из соответствующих значений  $b$  (аналогичный способ применяется при расчетах вручную ОРГРЭС). Прориведенные по этой методике многочисленные расчеты показали незначительность вносимого подобным образом уточнения для крупных систем и нецелесообразность затраты времени на его учет как при машинном, так и при ручном счете.

Утверждение В. С. Шаханова, что это вносит существенную погрешность, основано на недоразумении. Чтобы показать это, на рис. 5 представлена характеристика относительных приростов системы, на которую ссылается В. С. Шаханов для доказательства своего утверждения (см. рис. 2 [Л. 2]). Так как в [Л. 2] масштаб мощности не указан, при построении рис. 5 принят за 100%  $P=2000 \text{ Мвт}$ . (Характеристики, приведенные в [Л. 12] дают большую мощность системы и меньшую погрешность от неучета изменений относительного прироста энергосистемы.)

Расчеты по моей методике показывают, что при пуске турбины АК-25-1 с котлом производительностью 120 т/ч величина  $B'_{\text{a}}$  переходит через нуль при  $b=0,46$ . При этом нагрузка агрегата  $P_{\text{пуск}}=20 \text{ Мвт}$ . Как видно из рис. 5, пуск этого агрегата разгружает остальные станции с 1850 до 1830 Мвт. В результате относительный прирост снижается с 0,46 до 0,42 кг/квт·ч. При этом действительное изменение расхода топлива отличается от приближенной величины  $B'_{\text{a}}=bP_{\text{пуск}}$  на заштрихованную на рис. 5 площадку  $B''_{\text{a}}$ , которая в данном случае составляет всего 1,1% от  $B'_{\text{a}}$ . Показанный на рис. 5 случай пуска турбины ВК-50 с котла ТП-230 дает погрешность 1,9%. Случай пуска турбины ВК-100 с двумя котлами ТП-230 (на рис. 5 это не показано) дает погрешность 3,7%. Остановка агрегатов меньшей мощности, а также отдельных котлов или турбин дает меньшие погрешности.

Указывая на возможность значительных изменений относительного прироста системы при изменении числа агрегатов, В. С. Шаханов упустил из виду, что в области, где эти изменения

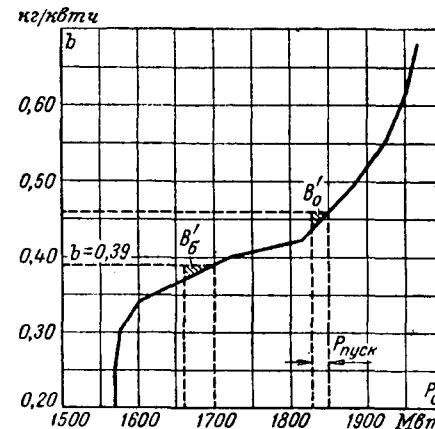


Рис. 5. Изменение относительного прироста системы при пуске турбины АК-25-1 с котлом 120 т/ч ( $b=0,46$ ) и турбины ВК-50-1 с котлом ТП-230 ( $b=0,39$ ).

нения велики, величина  $B'_s < 0$ , т. е. остановка агрегата дает перерасход и заведомо невыгодна, даже если не учитывать изменений относительного прироста системы. Необходимо также отметить, что рассмотренная В. С. Шахановым энергосистема входит в состав крупной объединенной системы. Поэтому при пуске (остановке) агрегата частично изменяется и нагрузка других систем, так что общее изменение относительного прироста получается меньшим. Наконец, неправомерно предположение В. С. Шаханова, будто изменение режима распространяется только на тепловые станции. Учет гидростанций [Л. 13 и 14] также снижает изменение относительного прироста системы.

Рассмотренный В. С. Шахановым случай значительного изменения относительного прироста системы в результате остановки целой группы агрегатов не имеет отношения к моей методике, так как она [Л. 13 и 14] предусматривает расчет изменения относительного прироста системы после остановки каждого отдельного агрегата.

Наконец, необходимо отметить, что остановка и пуск агрегатов обычно производятся в области быстрых изменений нагрузки и относительного прироста системы (спад нагрузки после максимума и подъем ее после провала). Поэтому погрешность 3—5% в величине относительного прироста, при которой выгодно останавливать или пускать агрегат при применении моей методики, вызывает погрешность в определении момента остановки или пуска агрегата обычно всего на несколько минут. Ввиду практической невозможности реализовать большую точность я и пришел к выводу о допустимости пренебрегать изменением относительного прироста при решении вопроса о целесообразности остановки или пуска агрегата в современной крупной системе, несмотря на полную возможность учсть это изменение.

Принципиальным отличием моей методики является выражение экономии от остановки (пуска) агрегата в функции относительного прироста, а не нагрузки системы. Это позволяет заранее подготовить материалы, необходимые для решения вопроса о порядке пуска или остановки агрегатов, сняв затруднение, связанное с наличием большого числа сочетаний работающих агрегатов на других станциях, так как это в полной мере учитывается величиной относительного прироста системы  $b$ . Упрощения, сделавшиеся на различных этапах разработки методики, необязательны, и их допустимость в каждом конкретном случае легко поддается проверке.

**Об учете статических характеристик нагрузки.** В своем отклике на мои замечания [Л. 3] Л. А. Крумм утверждает, будто в его статьях под термином «статические характеристики нагрузки» подразумевалось не общепринятое понятие — зависимость нагрузки потребителей от напряжения, а нечто другое. Однако в его работах никаких оговорок об этом не было сделано. Более того, отвечая на замечания С. А. Соловьева и автора этих строк по этому поводу на научно-техническом совещании в г. Киеве в 1960 г., Л. А. Крумм публично признал, что под статическими характеристиками нагрузки он понимал именно зависимость нагрузки потребителей от напряжения и что учет ее в предложенной им форме ошибочен.

Л. А. Крумм утверждает также, что огромная экономия, полученная им в примере, рассчитанном по его методу, по сравнению с методом относительных приростов, получена не столько за счет учета статических характеристик нагрузки, сколько за счет учета изменений реактивной нагрузки станций при изменении активной.

Возможно, что это и так, однако необходимость учета этих изменений для энергосистем, содержащих длинные линии электропередачи, неоднократно указывалась в моих работах. Возможность учета их при расчетах по методу относительных приростов также неоднократно иллюстрировалась примерами. В частности, для энергосистемы, для которой производил расчет Л. А. Крумм (Новосибирск — Омск), такой расчет был выполнен ОРГРЭС. Поэтому при сравнении своей методики с методом относительных приростов Л. А. Крумм обязан был выполнить сравнительные расчеты по методу относительных приростов также с учетом изменений реактивной мощности. Разумеется, при этом никакой экономии он не получил бы, так как оба метода являются строгими и при правильном применении дают одинаковые результаты. Основанием для применения того или иного из строгих методов является не экономия, которая при применении любого из них одинакова, а удобство расчетов.

**Об отклике В. Г. Журавлева [Л. 5].** С рядом замечаний, высказанных в этом отклике, согласиться нельзя.

Например, говоря об отсутствии единой методики испытаний основного оборудования станций для снятия характеристик и недостаточной достоверности поправок, вносимых в эти характеристики, автор делает вывод о необходимости полного отказа от заглавовременного построения характеристик. Более логично было бы сделать вывод о необходимости упорядочить проведение испытаний оборудования, тем более, что измерение относительных приростов в эксплуатации далеко не такая простая проблема, как предполагает автор. Она не решена до настоящего времени не из-за недостаточного внимания к ее решению, а из-за ряда трудностей принципиального характера, возникших при разработке устройств. Возможно, проблема эта будет в дальнейшем решена, что, однако, не снимет с повестки дня задачу заглавовременного расчета режимов, которую необходимо решать, особенно из-за наличия гидростанций в системе. Поэтому сохранится и необходимость в использовании при расчетах заранее построенных характеристик относительных приростов.

В корне ошибочно замечание В. Г. Журавлева о недопустимости определения относительного прироста с погрешностью порядка 5%, «поскольку, — как пишет он, — экономия топлива выражается значительно меньшей величиной». В литературе неоднократно доказывалось [Л. 15], что между этими величинами нет прямой связи и при погрешности характеристики 5% и более может быть достоверной экономия, составляющая долю процента от расхода топлива в системе. Кроме того, в настоящее время нет никаких оснований утверждать, что непосредственный замер относительного прироста в эксплуатации может обеспечить большую точность.

На недоразумений основано также утверждение В. Г. Журавлева, будто описанный в моей книге [Л. 18] способ пересчета характеристик гидростанций при изменении числа агрегатов «теоретически никак не обоснован». На самом деле он непосредственно вытекает из правил дифференцирования функций.

В столь же категорическом тоне В. Г. Журавлев объявляет «неприемлемым вообще» мое предложение не учитывать для крупных энергосистем изменение относительного прироста при остановке агрегата. Необоснованность этого была показана выше (рис. 5). В связи с этим необоснованна и критика В. Г. Журавлевым известного положения о выгодности (при неучете расходов тепла на пуск) останавливать или пускать блок котел — турбина в момент, когда его удельный расход равен относительному приросту энергосистемы. Это правило он ошибочно приписывает К. А. Смирнову. Оно было известно значительно раньше и сформулировано, в частности, в [Л. 16].

**О применимости метода относительных приростов.** Как известно, терминами «характеристика относительных приростов», «характеристика удельных приростов», «дифференциальная характеристика» и т. п. различные авторы обозначают одно и то же понятие — зависимость производной расхода (тепла, издержек, потерь в сети и т. п.) по нагрузке от нагрузки. Следовательно, названия «метод относительных приростов», «метод дифференциальных характеристик» и т. д. равносильны названию «метод производных» и противопоставление их В. С. Шахановым [Л. 2] лишено смысла.

Название «метод относительных приростов» было введено И. М. Марковичем в 1936 г. при переводе им статьи американских авторов Стейнберга и Смита и с тех пор применяется ко всем родственным методам. Помимо использования производных, их общая особенность состоит в применении заранее рассчитанных характеристик относительных приростов станций, отдельных агрегатов, потерь в сети и т. п. В настоящее время в известной мере (в части учета потерь в сети) отошли от метода относительных приростов Д. М. Гробман и Ю. И. Смирнов, К. А. Смирнов, Л. А. Крумм, не использующие относительных приростов потерь в сети. Что же касается работ В. С. Шаханова, то они так же, как и упомянутые им работы В. В. Болотова и др., являются (за исключением отмеченных выше ошибок) типичным примером применения метода относительных приростов. Точность, которую можно достигнуть при правильном применении как метода относительных приростов, так и новых методов математического программирования, при учете одних и тех же факторов одинакова, и выбор метода должен производиться, главным образом исходя из удобства расчета. Решение этого вопроса зависит от многих факторов и не может быть однозначным. Оно определяется характером решаемой задачи, типом применяемой вычислительной машины и даже тем, удалось ли

исследователю найти удачные приемы применения того или иного математического метода к решению конкретной задачи.

Утверждение В. С. Шаханова о неприменимости метода относительных приростов для машинного счета только на том основании, что он разрабатывался применительно к расчетам вручную, не выдерживает критики. Достаточно указать, что нашедшее широкое применение при машинном счете методы наискорейшего спуска, вариационные методы и т. п. разрабатывались Гауссом, Эйлером, Лагранжем и др. во время, когда о вычислительных машинах не было и речи, хотя, разумеется, бывают случаи, когда метод, удобный для ручного счета, мало эффективен при машинном.

В. С. Шаханов прав, указывая, что применение вычислительных машин позволяет резко повысить точность расчетов и отказаться от многих допущений, неизбежных при ручном счете. Однако в его работах эта возможность не реализована. Как показано выше, при учете потерь в сети, выборе состава агрегатов, назначении режима гидростанций им применены такие грубые и необоснованные упрощения, что эти задачи нельзя считать решенными. Необходимо также отметить крайне неясное изложение В. С. Шахановым основ своей методики. Поэтому не исключено, что она содержит и другие ошибки. Для практического применения методика В. С. Шаханова должна быть серьезно переработана и апробирована рядом специалистов.

Что касается замечаний, сделанных мною по отгликам других авторов, то эти замечания касались менее существенных вопросов и к тому же частично (Л. А. Крумм) учтены мною.

Изложенное выше содержит ответ и на замечания Ю. Н. Руденко и В. Н. Ясникова [Л. 4]. Основы предлагаемой мною методики я надеюсь опубликовать в ближайшее время.

**Приложение.** Вывод условия оптимального режима работы ГЭС с учетом нестационарных явлений в нижнем бьефе. Чтобы не затруднять изложение излишними подробностями, вывод дается для одной ГЭС и одной ТЭС при неучете потерь в сети.

Разобъем рассматриваемый период на ряд интервалов. Тогда расход топлива за период составит:

$$B = B_1 + \dots + B_j + \dots + B_n, \quad (\text{П. 1})$$

где индексы 1, ..., i, ..., n относятся к номерам интервалов.

Условие заданного расхода воды на ГЭС за весь период:

$$\varphi = Q_1 + \dots + Q_j + \dots + Q_n - Q_{\text{зад}}, \quad (\text{П.2})$$

где

$$Q_j = f(P_{rj}, H_j);$$

$P_{rj}$  — нагрузка ГЭС в j-м интервале;

$H_j$  — напор ГЭС в j-ом интервале.

Напор, как это сделано В. С. Шахановым [Л. 2], будем считать функцией нагрузок в данный и предыдущие интервалы, т. е.:

$$\begin{aligned} H_j &= f_j(P_{r0}, \dots, P_{rj}), \\ H_{j+1} &= f_{j+1}(P_{r0}, \dots, P_{rj}, P_{rj+1}), \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ H_n &= f_n(P_{r0}, \dots, P_{rj+1}, \dots, P_{rn}), \end{aligned} \quad (\text{П.3})$$

где  $P_{r0}$  — нагрузка ГЭС в интервале, настолько отдаленном от рассматриваемого, что влиянием нагрузок в предыдущие интервалы можно пренебречь.

Условия баланса мощности имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= P_1 + P_{r1} - P_{c1}, \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \psi_j &= P_j + P_{rj} - P_{cj}, \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \psi_n &= P_n + P_{rn} - P_{cn}. \end{aligned} \quad (\text{П.4})$$

Составляем функцию Лагранжа:

$$F = B + \lambda \varphi + \gamma_1 \psi_1 + \dots + \gamma_n \psi_n, \quad (\text{П.5})$$

где  $\lambda, \gamma_1, \dots, \gamma_n$  — постоянные множители.

Дифференцируя (П.5) по нагрузкам ТЭС и приравнивая производные нулю, получим (для j-го интервала):

$$\frac{dB_j}{dP_j} + \gamma_j = 0 \text{ или } b_j = -\gamma_j; \quad (\text{П.6})$$

аналогично для ГЭС:

$$\begin{aligned} \lambda \left( \frac{\partial Q_j}{\partial P_{rj}} + \frac{\partial Q_j \partial H_j}{\partial H_j \partial P_{rj}} + \frac{\partial Q_{j+1} \partial H_{j+1}}{\partial H_{j+1} \partial P_{rj}} + \dots + \right. \\ \left. + \frac{\partial Q_n}{\partial H_n} \frac{\partial H_n}{\partial P_{rj}} \right) = -\gamma_j = b_j; \end{aligned} \quad (\text{П.7})$$

если учесть потери в сети, то формула (П.7) примет вид:

$$\lambda \frac{\frac{\partial Q_j}{\partial P_{rj}} + \frac{\partial Q_j}{\partial H_j} \frac{\partial H_j}{\partial P_{rj}} + \frac{\partial Q_{j+1}}{\partial H_{j+1}} \frac{\partial H_{j+1}}{\partial P_{rj}} + \dots + \frac{\partial Q_n}{\partial H_n} \frac{\partial H_n}{\partial P_{rj}}}{1 - \sigma_{rj}} = b_j. \quad (\text{П.8})$$

## Литература

- Горнштейн В. М., «Электричество», 1961, № 8.
- Шаханов В. С., «Электричество», 1962, № 3.
- Крумм Л. А., «Электричество», 1962, № 3.
- Руденко Ю. Н., Ясников В. Н., «Электричество», 1962, № 4.
- Журавлев В. Г., «Электричество», 1963, № 9.
- Шаханов В. С., Метод и алгоритм вычисления экономичного распределения нагрузок в сложных гидротепловых энергосистемах на электронных цифровых машинах, Изв. АН СССР ОТН, Энергетика и автоматика, 1960, № 1.
- Шаханов В. С., Метод и алгоритм вычисления частных производных потерь в сложных сетях энергосистем на электронных цифровых вычислительных машинах, «Электричество», 1960, № 12.
- Шаханов В. С., Общий алгоритм вычислительной и управляющей электронной цифровой машины для экономической оптимизации оперативных режимов сложных энергетических систем, «Электричество», 1962, № 4.
- Шаханов В. С., Методика экономически целесообразного распределения резерва в гидротепловых энергосистемах с помощью цифровых управляющих машин, «Теплоэнергетика», 1960, № 6.
- Горнштейн В. М., Письмо в редакцию, «Теплоэнергетика», 1961, № 2.
- Шаханов В. С., О методе распределения резерва в энергосистемах с помощью электронных цифровых машин, «Теплоэнергетика», 1961, № 12.
- Максимов А. И., Побегайло К. М., Максимова В. И., Попович Н. А., Филатова Л. И. и Шаханов В. С., Экономически целесообразное распределение резервов на электростанциях Донбассэнерго методом компенсации, «Электрические станции», 1963, № 2.
- Горнштейн В. М., К вопросу о выборе наивыгоднейшего распределения резерва в энергосистемах, изд. ЭНИИ, 1958.
- Горнштейн В. М., О выборе наивыгоднейшего сочетания работающих агрегатов (распределения резерва) в системе, Труды ВНИИЭ, № XIII, Госэнергоиздат, 1961.
- Картвелишили Н. А., Влияние погрешностей характеристик относительных приростов на эффект оптимального распределения нагрузок между электростанциями, Изв. АН СССР ОТН Энергетика и автоматика, 1958, № 6.
- МЭС СССР, Руководящие указания по выбору наивыгоднейшего распределения активной нагрузки между тепловыми электростанциями, Госэнергоиздат, 1958.
- Горнштейн В. М., Наивыгоднейшее распределение нагрузки между параллельно работающими электростанциями, Госэнергоиздат, 1949.
- Горнштейн В. М., Наивыгоднейшие режимы работы гидростанций в энергосистемах, Госэнергоиздат, 1959.
- Горнштейн В. М., Работы ВНИИЭ в области оптимизации режимов энергосистем с помощью цифровых вычислительных машин, Труды конференции, Вопросы улучшения режимов энергосистем Сибири, Кемерово, 1963.

B. M. Горнштейн



## ПРОФЕССОР АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ ФЕДОСЕЕВ

К 60-летию со дня рождения и 35-летию инженерной научно-педагогической и общественной деятельности

19 июня 1964 г. исполняется 60 лет со дня рождения крупнейшего советского ученого и инженера, доктора технических наук, профессора А. М. Федосеева.

Алексей Михайлович родился в г. Харькове в семье инженера. С 1914 по 1918 г. он учился в местной гимназии, а в 1921 г. поступил на Пречистенские рабочие курсы в Москве, преобразованные затем в рабфак. В 1922 г. А. М. Федосеев поступил на электротехнический факультет Московского высшего технического училища, который успешно окончил в 1929 г. со званием инженера-электрика.

После окончания МВТУ Алексея Михайловича направляют в проектный отдел Энергостроя, реорганизованного в 1932 г. в трест, а затем в институт Теплоэлектропроект, и с этого времени он навсегда связал себя с советской энергетикой, пройдя путь от инженера до известного в Советском Союзе и за рубежом ученого, новатора, руководителя школы специалистов релейной защиты и системной автоматики. Алексей Михайлович и поныне является начальником отдела релейной защиты и системной автоматики, устойчивости моделирования и телемеханизации энергосистем Всесоюзного государственного проектно-изыскательского и научно-исследовательского института Энергосетьпроект ГПКЭ и Э СССР. Под его руководством разработано большое количество оригинальных проектов в области релейной защиты и автоматики, в частности уникальные проекты дальних электропередач 400—500—750 кв, в которых был обобщен огромный опыт проектирования, эксплуатации и реустройства в СССР.

В институте Энергосетьпроект (б. ТЭП) им организована релейная лаборатория, которая сыграла значительную роль в деле развития релейных защит и реустройства и моделирования электрических систем.

За участие в работах по моделированию профессор А. М. Федосеев в 1947 г. был удостоен звания Лауреата Государственной премии, а в апреле 1964 г. за работу по созданию комплекса релейной защиты и автоматики дальних электропередач сверхвысоких напряжений удостоен звания Лауреата Ленинской премии 1964 г.

Огромная эрудиция, глубокие и всесторонние знания, умение обобщать большой опыт, инженерный подход к решению технических и научных задач — все эти качества Алексея Михайловича во-



многом способствовали развитию отечественной энергетики и завоеванию приоритета Советским Союзом в области релейной защиты и системной автоматики сверхдальних линий электропередач и сверхмощных тепловых и гидравлических электростанций.

В сочетании с производственной деятельностью А. М. Федосеев ведет с 1931 г. педагогическую работу в Московском энергетическом институте, где он прошел большой путь от рядового преподавателя до профессора, доктора технических наук. В последние годы он избран деканом электроэнергетического факультета. При его непосредственном участии в МЭИ создана специальность релейной защиты и автоматики энергосистем, оборудованы соответствующие лаборатории и создана база для научно-исследовательской работы, что способствует выпуску МЭИ высококвалифицированных кадров в области релейной защиты и автоматики энергетических систем. Ценно в Алексее Михайловиче то, что все достижения промышленности он немедленно использует в своей педагогической деятельности и, наоборот, научно-теоретические достижения кафедры становятся достоянием промышленности.

Алексей Михайлович написал ряд фундаментальных трудов, обобщающих теорию и практику релейной защиты. Два последних издания его капитального труда «Основы релейной защиты» явля-

ются уникальным и ценным вкладом в отечественную электротехническую литературу. Первое издание этого труда переведено на несколько иностранных языков. Книги Алексея Михайловича, равно как и читаемые им лекции, отличаются четкостью, глубокой научностью, практической инженерной направленностью, предельной ясностью и краткостью.

Под руководством А. М. Федосеева были созданы «Руководящие указания по релейной защите», 1933, 1937, 1939, 1943, 1948 и 1961—1963 гг. Эти Указания являются отражением прогрессивной технической политики в области отечественной релейной защиты и позволяют иметь единство в применяемых решений в энергосистемах. Они оказывают существенное влияние на формирование технической политики в области релейной защиты стран — участниц СЭВ.

Алексей Михайлович, являясь выдающимся практиком и теоретиком, талантливым инженером и ученым, привлекается к экспертизам проектов союзного значения. Он бессменный член Технического совета Государственного производственного комитета по энергетике и электрификации СССР и член ученых советов Московского энергетического института.

Одновременно с разнообразными служебными обязанностями А. М. Федосеев проводит огромную общественную деятельность. Он является членом редакционной коллегии журнала «Электричество», членом правления МОНТОЭП и председателем бюро секции по релейной защите, автоматике и телемеханике, членом секции электрических сетей и энергосистем Научного совета по проблеме «Энергетика» и электрификации ГНКНИР и членом секций ряда технических советов (ВНИИЭ и др.); он также работает в экспертной комиссии по электротехнике Министерства высшего и специального среднего образования СССР.

Алексей Михайлович обладает прекрасными личными качествами — скромностью, радушным человеческим и товарищеским отношением ко всем, кто с ним общается, большой отзывчивостью, огромным чувством ответственности за порученное дело и трудолюбием, увлеченностю своей специальностью, честностью и многими другими.

За большие заслуги перед государством А. М. Федосеев удостоен правительственные наград — ордена Трудового Красного Знамени, двух орденов Знак почета и медалей.

РЕДКОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА  
Г. В. Буткевич, Б. Б. Воронецкий, Д. В. Васильев, Н. Г. Дроздов, Л. А. Дубинский, Л. А. Жекулин, А. М. Залесский, А. С. Касаткин, М. П. Костенко, П. И. Кузнецов, В. С. Кулебакин, Л. Г. Мамиконянц, Н. А. Мельников, Л. Р. Нейман, И. И. Петров, С. И. Рабинович, В. А. Самохвалов, В. В. Соловьев, И. А. Сыромятников, М. Г. Чиликин, А. С. Шаталов.  
ТОВАРИЩИ ПО РАБОТЕ: Д. И. Азарев, В. А. Веников, П. Г. Грудинский, Е. Д. Зейлидзон, В. М. Ермоленко, А. И. Колпакова, С. Я. Петров, Д. В. Разевиг, С. С. Рокотян, М. А. Саркисов, И. И. Соловьев, Э. П. Смирнов, А. Б. Чернин, С. А. Ульянов, П. А. Устинов и др.

# Библиография

УДК 621.34

## ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

«Die Technik der elektrischen Antriebe. Grundlagen» Berlin,  
VEB Verl. Technik, 1963, 536 S., ill, 27 50 ДМ.

Всесоюзный институт научной и технической информации АН СССР и ГК СМ СССР  
по координации научно-исследовательских работ.

Книга «Основы электропривода» («Die Technik der elektrischen Antriebe. Grundlagen»), изданная Центральным проектно-конструкторским бюро по проектированию электроустановок Управления народных предприятий, представляет собой первый том двухтомника «Электропривод» («Die Technik der elektrischen Antriebe» серия VEM-Handbuch). Второй том «Примеры практического применения систем электропривода» («Antriebstechnik in der Praxis») выйдет в свет в ближайшее время. Двухтомник написан коллективом авторов — научными сотрудниками Института электрических машин и привода Высшего технического университета в Дрездене под руководством профессора К. Поммера и профессора Р. Лаппе и Института электропривода при Высшей технической школе в Ильменау. Общая редакция и предисловие профессора Ф. Цайса.

В рецензируемой книге освещены основные вопросы работы систем электропривода, а также изложены основы теории непрерывных систем автоматического управления и регулирования, широко применяемых в системах современного автоматизированного электропривода. Кроме того, кратко описаны элементы и принципы работы вычислительных устройств дискретного действия.

В предисловии редактор книги профессор Ф. Цайс отмечает, что поскольку все возрастающие требования, предъявляемые к системам электропривода относительно скоростей и точности выполнения технологических операций, в настоящее время нельзя реализовать без применения средств и методов техники автоматического регулирования, необходимо рассматривать электропривод и систему управления им как единое целое и оценить работу всей системы не только в статике, но и в динамике. Поэтому данная книга является попыткой объединить вопросы теории классического электропривода с вопросами автоматического управления и регулирования электроприводами, что делает ее построение интересным и оригинальным.

К достоинствам книги следует также отнести и то, что в ней рассматриваются системы электропривода, содержащие современные прогрессивные средства автоматизации; им уделяется большее внимание, чем средствам и методам, применявшимся в прошлом и сохранившим свое значение в настоящем. Это касается в первую очередь систем с магнитными и полупроводниковыми усилителями, а также с безнасосными ртутными выпрямителями.

Книга предназначена для специалистов, работающих в области автоматизированного электропривода, она может быть также полезной для студентов, специализирующихся в этой области. Материал изложен в весьма доступной форме и в тоже время на высоком научно-техническом уровне. Ценным в книге является большое количество табличных данных и ссылок на нормы и технические условия, действующие в ГДР. Большое количество диаграмм, чертежей и примеров делает книгу удобным пособием при самостоятельном изучении вопроса.

Книга состоит из предисловия, шести разделов, приложения, перечня литературы и предметного указателя. Перечень литературы составлен по разделам и содержит более 450 наименований; имеются ссылки на труды советских авторов Ю. А. Сабинина, В. В. Солововникова, М. Г. Чиликина и др.

В первом разделе «Соответствие приводного двигателя требованиям рабочего механизма» изложены основы механики электропривода: дано уравнение движения электропривода, понятие о динамическом и статическом моментах, приведена классификация исполнительных механизмов по характеру статического момента; здесь же рассмотрен вопрос о статической устойчивости системы.

Во втором разделе, самом большом по объему и количеству рассмотренных в нем тем, объединяется тот круг вопросов, который в традиционной нашей литературе составляет основное содержание учебных книг по теории электропривода, т. е. характеристика основных типов приводных двигателей в установившихся и переходных процессах, а также их регулировочные свойства. Весь этот материал комплектуется по типам двигателей. Из систем постоянного тока наиболее

подробно рассмотрены: система Г—Д с возбуждением генератора от ЭМУ или ионного преобразователя, система согласно-встречного включения и система УРВ—Д. Интересна схема питания синхронного двигателя от ионного преобразователя частоты. Регулированию скорости асинхронных двигателей уделено много места. Рассмотрены параметрические методы (схемы с включением активного и индуктивного сопротивлений в цепь статора и ротора, с МУ с внутренней обратной связью в цепи статора) и регулирование двигателя при питании его от источника переменной частоты, разные типы каскадов; схема с вихревым тормозом на валу; типы электромагнитных муфт. Кроме того, анализируется работа однофазных асинхронных двигателей (конденсаторных, с расщепленными полюсами, двигателя Феррариса) и коллекторных машин переменного тока. При анализе неустановившихся режимов работы электроприводов учитывались механические и электромагнитные переходные процессы.

В третьем разделе «Непрерывные системы управления и регулирования электроприводами» изложены основные положения теории автоматического регулирования и рассмотрены системы автоматического регулирования электроприводами с двигателями асинхронными и постоянного тока с независимым возбуждением. Введение этого раздела и последующего, посвященного цифровым системам регулирования, в книгу по электроприводу особенно наглядно подтверждает современную тенденцию в развитии электропривода как единого целого, состоящего из электрических машин и системы управления электрифицируемого агрегата. Это, пожалуй, самый интересный раздел книги.

Раздел состоит из четырех подразделов. В первом даны основные понятия и определения замкнутых систем автоматического регулирования в соответствии со стандартом TGLO-19226 — передаточная функция, амплитудно-фазовые и частотные характеристики, а также понятие о статических и динамических характеристиках контура регулирования. Во втором — основные узлы системы регулирования: измерительные элементы (тахогенераторы, трансформаторы постоянного тока и т. д.), задающие устройства, усилители (ЭМУ, ионные усилители, управляемые и неуправляемые полупроводниковые усилители, МУ), корректирующие цепи и цепи обратной связи. В третьем — системы электропривода с двигателем постоянного тока. Здесь дан анализ систем регулирования скорости изменения напряжения на якоре и в цепи возбуждения; приведены дифференциальные уравнения, даны блок-схема и передаточные функции для систем Г—Д с ртутными выпрямителями и ЭМУ в цепи возбуждения, МУ—Д и системы регулирования скорости двигателя постоянного тока ослаблением поля; рассмотрена система синхронного вращения и позиционная следящая система. В четвертом — блок-схемы, передаточные функции асинхронного двигателя и систем регулирования скорости и торможения. Особенно интересны схемы регулирования двухфазного и трехфазного двигателей с помощью МУ в цепи статора. Рассмотрены системы синхронного вращения с асинхронными машинами.

В первой части четвертого раздела «Приборы и методы цифрового управления и регулирования электроприводами» после краткого перечисления задач автоматики, решаемых с помощью устройств дискретного действия, и сравнения непрерывной и дискретной систем управления, изложены проблемы, возникающие при синтезе логических схем, и описаны методы синтеза, основанные на законах и принципах алгебры логики. Приведена сводная таблица всех возможных комбинаций значений выхода при двух переменных, в которой даны названия функций, значения выходной переменной в зависимости от комбинации входных переменных, символическое обозначение функций и выражение их в нормальных формах. Подробнее других вопросов рассмотрены правила получения минимальных форм (выражение функций в форме произведения сумм или суммы произведений); в основу определения минимальных форм положен метод Карно (карты Карно). С целью повышения наглядности изложения все понятия, отдельные операции и шаги синтеза объясняются с помощью простых примеров, относящихся к комбинационным функциям.

Основное место в этом разделе занимает подраздел «Приборы и элементы дискретных систем управления и регулирования электроприводами», в котором подробно рассмотрены: 1) коммутирующие элементы (контактные и бесконтактные на транзисторах и магнитных усилителях); 2) логические элементы на полупроводниковых вентилях и сопротивлениях, на транзисторах и магнито-полупроводниковые логические элементы. Приведены схемы и описана работа логических элементов. Даны основные параметры логических элементов на диодах и транзисторах, выпускаемых фирмами AEG, SSW, BBC и др.; 3) устройства счета (суммирующие и вычитающие счетчики, регистры) на полупроводниковых и ферритовых сердечниках; 4) запоминающие устройства (перфоленты и магнитные ленты с многодорожечной записью).

В подразделе «Запись и обработка информации, заданной двоичным кодом» приведены типы двоичных кодов, используемые для шифровки программ, и схема устройства контроля записи и перевода программы из одного кода в другой. Процесс составления программы и ее записи на перфокарте показан на примере программы управления нажимными винтами прокатного стана. Кратко описан принцип действия считающего устройства, тактового датчика и преобразователей дискретных величин в аналоговые и аналоговые в дискретные.

Принципы построения цифровых систем показаны на схеме регулирования скорости двигателей постоянного тока; сравниваются непрерывные и цифровые системы, их общность и различие, методы измерения и устройства сравнения. Этот подраздел («Цифровые системы регулирования скорости») дан схематически и сжато. Вообще раздел четвертый носит ознакомительный характер.

В пятом разделе освещены вопросы выбора мощности приводного двигателя. В отличие от утвердившейся в нашей литературе классификации режимов (длительный, кратковременный и повторно-кратковременный), авторы рецензируемой книги в соответствии с нормами VDE 0530 классифицируют режимы работы с большей детализацией, т. е. кроме вышеуказанных режимов вводят еще понятия: продолжительный режим с повторно-кратковременной нагрузкой (DAB) и продолжительный режим с кратковременной нагрузкой (DKB), а также целый ряд режимов, характеризующихся нагревом двига-

теля при пуске, торможении и реверсе (непрерывный режим пуска и торможения — DSB, повторно-кратковременный режим, состоящий из пусков и торможения — ASB, и их модификации). Даны определения этих режимов. При выводе основных соотношений электрическая машина рассматривается как однородное тело с бесконечно большой теплопроводностью. Методика выбора мощности двигателя для длительного, кратковременного и повторно-кратковременного режимов ничем не отличается от принятой в советской литературе; режим DAB (машина работает то под нагрузкой, то на холостом ходу без пауз;  $t_p < 3t$ ,  $t_0 < 3t$ ) сводится к эквивалентному длительному режиму; для выбора мощности двигателя в режиме DKB (двигатель работает под нагрузкой кратковременно, за время холостого хода успевает охладиться до установившейся температуры холостого хода;  $t_p < 3t$ ,  $t_0 > 3t$ ) вводится коэффициент термической перегрузки. Процессы пуска и торможения рассматриваются как особые случаи повторно-кратковременного или продолжительного режимов с повторно-кратковременной нагрузкой, в которых нагрев машины определяется преимущественно потерями переходных процессов. Характеризуются эти режимы числом допустимых включений в час  $Z$ ; выведены коэффициенты, связывающие величину  $Z$  с допустимым числом включения машины на холостом ходу  $Z_0$  при разных видах нагрузки на валу. Принятая в книге классификация режимов будет небезинтересной для советских специалистов.

В шестом разделе «Выбор и расчет аппаратуры устройств управления и защиты» кратко описаны типы автоматических выключателей, контакторов, разъединителей и сопротивлений, применяемых в системах электропривода, и даны рекомендации по выбору последних. Основное внимание уделено устройствам защиты, в первую очередь от перегрузки и коротких замыканий. Как прогрессивное направление, отмечается развитие защитных устройств, встраиваемых в двигатель (термометры, термоэлементы).

Оценивая книгу в целом, следует сказать, что авторам удалось в сжатой форме изложить весьма обширный и ценный материал и что такая книга будет представлять интерес для советского читателя. Ее рекомендуется перевести на русский язык.

**К. И. Наумычев**

УДК 03.821.3

## СПРАВОЧНИК ЭЛЕКТРИКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Составитель Л. Б. Гейлер. 587 стр., ц. 1 р. 50 к. Государственное издательство  
Белорусской ССР, Минск, 1963.

За последние годы различными издательствами было выпущено несколько универсальных справочников для электриков и энергетиков промышленных предприятий. В них наряду с общими сведениями приводится значительное количество каталоговых данных различного оборудования, что увеличивает объем и стоимость книги. Между тем значительная часть приведенных сведений зачастую устаревает еще до выхода книги в свет, и это является причиной, ограничивающей круг читателей и срок пользования.

Рецензируемый справочник отличается от ранее выпущенных тем, что составитель сосредоточил в нем в основном сведения общего характера по вопросам, часто возникающим в повседневной практике электрика. Эти сведения можно будет использовать в течение ряда лет.

К несомненным достоинствам справочника следует отнести большое количество оригинального материала, разработанного автором, или материала, заимствованного из зарубежной литературы и впервые публикуемого в нашей печати, а также наличие в большинстве разделов подробных примеров расчета, облегчающих пользование формулами и графиками. Издание справочника следует считать своеобразным и целесообразным.

Судя по названию, справочник предназначается для персонала, занятого эксплуатацией электрооборудования промыш-

ленных предприятий. Однако содержание его в значительной части представляет интерес для сотрудников проектных организаций и студентов вузов.

Перед составителем стояла трудная и сложная задача — в одной небольшой книге осветить такие важные и крупные вопросы, как выбор и проектирование электрических машин, аппаратуры управления, электроснабжения, освещения, энергопотребления промышленных предприятий. В основном можно считать, что выбор материала, помещенного в книге, сделан удачно.

В пятнадцати разделах Справочника содержатся материалы следующего характера:

- 1) наиболее важные термины и их определение;
- 2) удельные показатели, относительные величины, таблицы и кривые для ускоренных расчетов;
- 3) формулы и примерные расчеты для условий эксплуатации как нормальных, так и отклоняющихся от них;
- 4) удельные расходы электрической энергии в различных отраслях промышленности и в отдельных производственных процессах;
- 5) обзорные данные по электрооборудованию.

Наибольшую ценность представляют такие сведения, как универсальные характеристики асинхронных двигателей в относительных величинах, проверка условий пуска асинхронных

короткозамкнутых двигателей от генераторов и сетей ограниченной мощности, анализ и расчет схем несимметричного включения трехфазных асинхронных двигателей, таблицы и графики для ускоренных расчетов.

Исходя из назначения книги, представляется целесообразным без существенного увеличения объема дополнить справочник сведениями, непосредственно относящимися к вопросам обеспечения бесперебойной работы и повышению эксплуатационной надежности электрооборудования, а именно: общими сведениями о профилактических мероприятиях, периодических осмотрах, определению характера и мест повреждения электрооборудования; общими данными по ремонту электрооборудования (упрощенный расчет обмоточных данных при ремонте, сушке электрических машин и т. д.). Одновременно следовало бы привести основные теоретические положения, а также сведения для определения количественных показателей надежности.

В отдельную главу следовало выделить общие сведения и рекомендации по экономии электроэнергии на промышленных предприятиях.

В справочнике отсутствует аннотация, и в предисловии нет указаний, для какой категории читателей (инженера, техника или мастера) предназначается книга. Отсутствие направленности привело к тому, что часть материала по представленным темам не может полностью удовлетворить инженера или техника, а для мастера слишком сложна. Пользование справочником затруднено вследствие отсутствия предметного указателя.

По тексту справочника имеется ряд замечаний и пожеланий:

1. Книга была сдана в набор после опубликования ГОСТ 9867-61 «Международная система единиц», которая с 1 января 1963 г. применяется в СССР как предпочтительная. Поэтому если не было возможности переработать текст книги в соответствии с ГОСТ 9867-61, следовало привести соответствующую таблицу единиц физических величин и переводных коэффициентов.

2. В табл. 1—8 приведены рекомендуемые и нерекомендуемые термины, однако составитель неоднократно нарушает свои же рекомендации, применяя в дальнейшем тексте термины «демпферная обмотка» вместо «успокоительная обмотка» и «число оборотов минуту» вместо «скорость вращения».

3. Хотя с момента опубликования ГОСТ 7624-55 на услов-

ные графические обозначения в электрических схемах прошло более 8 лет, многие рисунки (например, 2-15, 2-20, 5-24, 6-15, 7-1, 9-2 и др.) выполнены с нарушением указанного стандарта.

4. Классификация классов точности электроизмерительных приборов (табл. 2-62) не соответствует ГОСТ 1845-59.

5. Ориентировочные значения кратности тока холостого хода асинхронных двигателей, приведенные в § 2-13, не полностью соответствуют данным табл. 2-36.

6. Многие рисунки (например, 4-1, 4-3, 5-11 и др.), уместные в учебниках и учебных пособиях, не представляют ценности в качестве справочных.

7. Раздел 8 следовало дополнить сведениями по силовым управляемым кремниевым выпрямителям (тиристорам). Рекомендации таблицы 8-6 не соответствуют современному состоянию развития полупроводниковых (сухих) выпрямителей.

8. Раздел XIII следовало дополнить сведениями о прожекторном освещении и о новых источниках света для наружного освещения.

9. Поскольку в настоящее время для линий электропередачи допустимо применение только алюминиевого провода, не следовало в § 14-5 ограничиваться кривыми для ускоренного расчета воздушных линий с медными проводами. Аналогичные кривые должны быть представлены и для случая расчета линий с алюминиевыми проводами.

10. Сведения, относящиеся к передвижным электростанциям, частично устарели. Следует руководствоваться ГОСТ 1032-62, который предусматривает выпуск дизельэлектрических станций мощностью 4, 12, 20 ... 250 квт и т. д. при номинальной скорости вращения 1 500 об/мин.

Сделанные замечания не снижают общего положительного впечатления от книги, так как они могут быть устранены при ее переиздании. Нет сомнения, что справочник окажется полезным практическим и теоретическим пособием для инженеров и техников, работающих в различных областях электрификации промышленности, а также для студентов электротехнических высших учебных заведений. Следует пожелать автору продолжить работу над дальнейшим совершенствованием этой полезной для широкого круга читателей книги.

Отзыв обсужден и одобрен на кафедре электрооборудования и электрических машин Московского института нефтехимической и газовой промышленности им. Губкина и в лаборатории электропривода Гипронефтемаша.

**Кандидат техн. наук И. И. Суд и кандидат техн. наук Б. М. Школьников**

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Н. И. Борисенко, Г. В. Буткевич, Б. Б. Воронецкий, Д. В. Васильев, Н. Г. Дроздов (главный редактор), Л. А. Дубинский, Л. А. Жекулин, А. М. Залесский, А. С. Насаткин, М. П. Костенко, П. И. Кузнецов, В. С. Кулебакин, Л. Г. Мамиконянц, Н. А. Мельников, Л. Р. Нейман, И. И. Петров, С. И. Рабинович, В. А. Самохвалов, В. В. Соловьевников, И. А. Сыромятников, А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, А. С. Шаталов.**

**Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2/10. Телефон: К 4-24-80.**

**Почтовый адрес: Москва, Главный почтamt, почтовый ящик № 648.**

**Адрес для телеграмм: МОСКВА, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.**

Сдано в пр-во 20/IV 1964 г.  
Формат бумаги 60×92<sup>1/2</sup>  
Т-04379

Подписано к печати 28/V 1964 г.  
Уч.-изд. л. 14,7  
Зак. 1209

Московская типография № 10 Главполиграфпрома Государственного комитета Совета Министров СССР по печати.  
Шлюзовая наб., 10.

## ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

Продолжается подписка на научно-технический и производственный журнал „Энергетические системы и электротехническое оборудование“ — полный перевод журнала „IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems“, США, издаваемый издательством „ЭНЕРГИЯ“ на русском языке (12 номеров в год).

В журнале, являющемся официальным органом Американского института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, помещаются впервые публикуемые научно-технические доклады ведущих специалистов, дискуссии и отчеты по теоретическим, экспериментальным и практическим работам в области электротехники и ряда смежных технических отраслей, отражающие современный опыт и последние достижения научно-технической мысли в США.

Широко освещаются вопросы, связанные с производством и распределением электроэнергии, сооружением и эксплуатацией тепловых, гидравлических и атомных электростанций, энергетических систем, линий электропередачи и подстанций.

Особое внимание уделяется снижению капитальных затрат и экономике производства и передачи электроэнергии.

Сообщается о достижениях в области конструирования, испытаний и применения электрических машин, коммутацион-

ной аппаратуры и аппаратуры управления, а также кабелей, проводов и изоляционных материалов.

Рассматриваются вопросы комплексной автоматизации, механизации и телемеханизации процессов производства и распределения электроэнергии. Даётся описание разнообразных систем автоматического управления, вычислительных устройств, техники связи.

Приводятся материалы по сбору и обработке информации, автоматической записи, кодированию и контрольно-измерительным приборам.

Статьи и доклады сопровождаются рисунками и схемами.

Журнал рассчитан на широкий круг научных работников, инженеров-исследователей и разработчиков, преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов, а также на инженеров производственников и рационализаторов, заинтересованных в расширении своего кругозора и теоретической подготовки по специальности в соответствии с современными требованиями.

Подписка принимается всеми отделениями Союзпечати и районными конторами связи с любого очередного месяца.

При подписке ссылайтесь на индекс 72516 каталога «Зарубежных газет и журналов».

Подписная плата	1 мес.	1—75
	6 мес.	10—50
	12 мес.	21—00

## НОВЫЙ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ «СИЛИКОН»

### ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Для заполнения или изоляции различного электротехнического хрупкого оборудования используется

#### СМОЛА СИ 182.

Силиконовая смола, прозрачная и бесцветная, благодаря своей большой текучести может проникать в самые малые отверстия. Она обладает следующими преимуществами:

стабильностью физических и электрических свойств (от  $-65$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ );

электроизоляционными свойствами при сверхвысоких частотах: диэлектрическая проницаемость

при  $8,5 \cdot 10^9$  Гц  
2,81 при  $-55^{\circ}\text{C}$   
2,45 при  $+150^{\circ}\text{C}$

тангенс угла потерь

при  $8,5 \cdot 10^9$  Гц  
 $7 \cdot 10^{-2}$  при  $-55^{\circ}\text{C}$   
 $7 \cdot 10^{-3}$  при  $+150^{\circ}\text{C}$

хорошей механической прочностью (от 55 до 70 кг/см<sup>2</sup>);

хорошими противоударными свойствами: слабой передачей вибраций и ударов;

цеплением и эластичностью: удлинением на разрыв порядка 100%; саморастяжением, измеренным согласно норме АСТМД 635;

большой легкостью ремонта: при замене дефектных изолированных деталей часть силиконового покрытия СИ 182 может быть вырезана, после исправления катализированная смола заливается в отверстие и хорошо соединяется с целым;

прозрачностью, благодаря чему покрытые части хорошо видны;

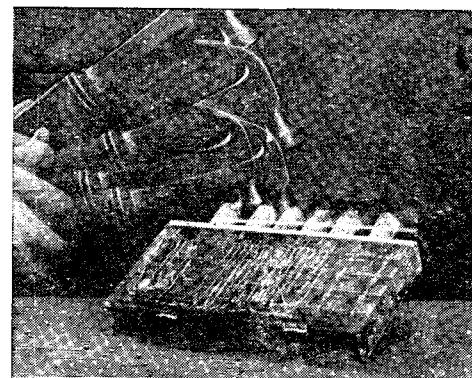
отсутствием деполимеризации: даже в тех случаях, когда смола нагрета в закрытой атмосфере.

СМОЛА СИ 182 используется в электротехнической и электронной промышленности.

СМОЛА СИ 183 является прозрачной модификацией того же вещества, которое улучшает свои термические качества (никакого старения после 1 000 ч при  $250^{\circ}\text{C}$ ).

СМОЛЫ СИ 182 и СИ 183 производятся фирмой СИСС в г. Лионе (Франция).

За всеми справками обращаться К ГЛАВНОМУ АГЕНТУ ПО ПРОДАЖЕ ДЛЯ СССР.



SONOCOM

36, rue de Chateaudun, Paris—France

TELEFONE PIG 71-49

Adresse telegraphique: BERMU,

Telex PICAVETCO 21-808

**SISS**  
SILICONES

# СТЕКЛЯННЫЕ ТРУБКИ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

Мы изготавливаем трубы из стекла с очень малыми допусками самыми современными и эффективными методами. Они изготавливаются поточным способом, чтобы обеспечить потребности производителей флуоресцентных ламп.

Мы изготавливаем также с той же высокой точностью трубы диаметром от 1,30 до 38,00 *мм* из стекла с примесью свинца. Это стекло используется как в флуоресцентных лампах, так и в лампах накаливания. Указанные трубы применяются в то же время в качестве важных частей малых электронных приборов, для которых точность размера очень важна.

Кроме указанных изделий, мы изготавливаем:

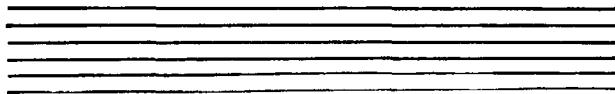
**СДВИЖНЫЕ КРЫШКИ И ПРЕДМЕНТНЫЕ СТЕКЛА  
ДЛЯ МИКРОСКОПОВ**

**ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМЫЕ ПОДКОЖНЫЕ ШПРИЦЫ ИЗ СТЕКЛА**

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ СТЕКЛЯННЫЕ ШТАМПОВКИ  
СТЕКЛО ДЛЯ ФАР АВТОМОБИЛЕЙ**

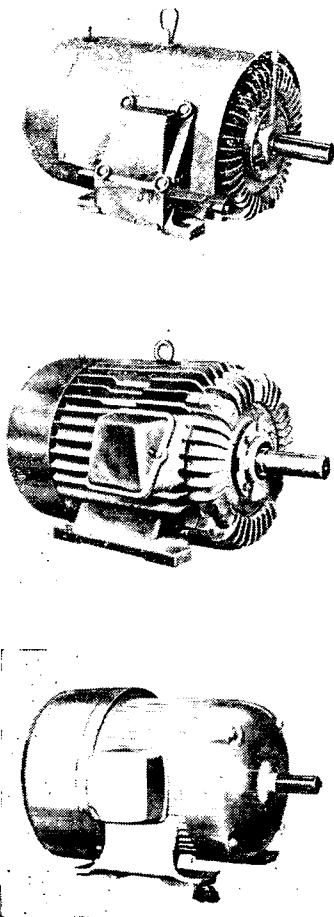
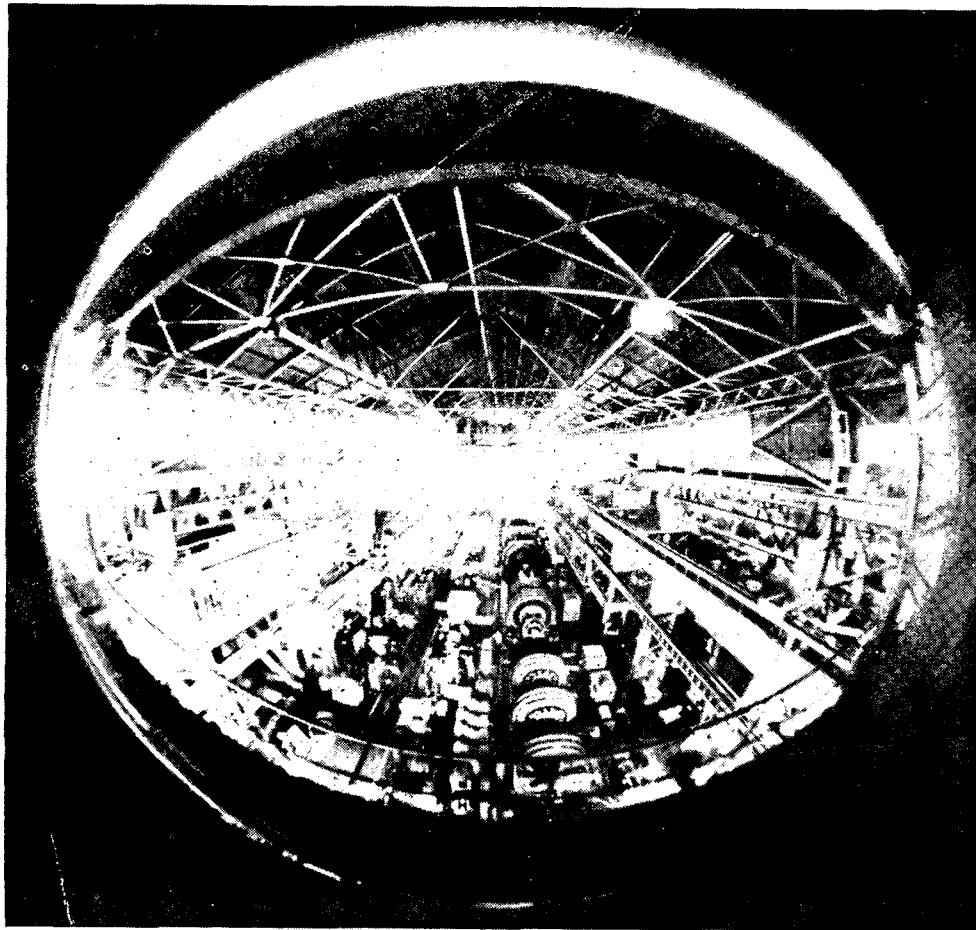
**За дальнейшей информацией просим  
обращаться по адресу:**

THE SALES MANAGER,  
CHANCE BROTHERS LIMITED,  
GLASSWORKS, SMETHWICK 40,  
BIRMINGHAM, ENGLAND, АНГЛИЯ





# Мускулы, двигающие промышленность



Моторы — это мускулы современной промышленности. ЯСКАВА ЭЛЕКТРОМАШНОСТРОИТЕЛЬНАЯ К°, опираясь на свои научно-исследовательские учреждения, которые стоят на самом высоком уровне в мире, совершенствует и усиливает эти мускулы. Выпуская более крупные и более скоростные моторы и производя автоматически контролирующие приборы, ЯСКАВА К° расширяет промышленность и продвигает ее вперед в области промышленной электроники. Полувековая деятельность компании ЯСКАВА свидетельствует, что она всегда усиливала и усиливает мускулы промышленности, в результате чего производство неуклонно продвигается вперед.

Деловым кругам мира известно, что фирма ЯСКАВА наилучшим образом производит всевозможные типы электромоторов, генераторов и аппаратов автоматического контроля. Для горной и химической промышленности она дает безопасные в отношении огня электромоторы и переключатели, а для бумажной промышленности — электромоторы, позволяющие осуществлять секционное движение бумагоделательной машины. В производстве сервомоторов фирма ЯСКАВА далеко опередила все другие фирмы.

Все сорта электромоторов и контролирующих их приборов  
для промышленного использования  
ЯСКАВА ЭЛЕКТРОМАШНОСТРОИТЕЛЬНАЯ К°, LTD.

(YASKAWA ELECTRIC MFG. CO., LTD).  
TOKYO OFFICE: Ohtemachi Bldg., Chiyoda-ku,  
Tokyo, Japan. Cable. Address: YASKAWAMOTOR TOKYO

