

6.  
А.60

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

ТОМСКИЙ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА  
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ ИМЕНИ С. М. КИРОВА

---

На правах рукописи

С. П. ВАСИЛЬЕВСКИЙ

# КАСКАДНЫЙ ПУСК КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Диссертация написана на русском языке

(Специальность № 05.230 — Электрические машины)

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Томск · 1971

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

ТОМСКИЙ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА  
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ ИМЕНИ С. М. КИРОВА

---

На правах рукописи

С. П. ВАСИЛЬЕВСКИЙ

# КАСКАДНЫЙ ПУСК КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Диссертация написана на русском языке

(Специальность № 05.230 — Электрические машины)

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Томск · 1971





Работа выполнена на кафедре общей электротехники и промышленной электроники Пермского политехнического института.

Официальные оппоненты:

Член-корреспондент АН УССР, доктор технических наук, профессор Постников И. М. (Киев).

Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Сиунов Н. С. (Свердловск).

Доктор технических наук, профессор Кононенко Е. В. (Томск).

Ведущее предприятие:

Всесоюзный научно-исследовательский институт электромашиностроения (ВНИИЭлектромаш) (Ленинград).

Защита диссертации состоится 25 января 1972 г. на заседании совета по присуждению ученых степеней Томского университета им. С. М. Кирова. Автореферат расослан 25 января 1971 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас принять участие в работе совета или прислать свой отзыв о работе в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: г. Томск, 4, проспект им. Ленина, 30, ТПИ, Ученому секретарю.

Ученый секретарь совета А. П. Беляева.

## ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное развитие всех отраслей отечественной промышленности, осуществляемое на основе автоматизации, комплексной механизации и интенсификации производственных процессов, сопровождается ростом энергоемкости и мощности отдельных токоприемников и, в частности, электроприводов, величина которой уже в настоящее время достигает несколько тысяч киловатт в единице. Основными типами двигателей мощных приводов, применяемых в отечественной промышленности, являются синхронные и реже асинхронные короткозамкнутые двигатели.

Весьма важным фактором, характеризующим перспективы развития мощного и сверхмощного привода, является существующая во многих промышленно развитых странах мира (ФРГ, США, Япония, Франция и др.) тенденция к широкому применению для таких приводов короткозамкнутых двигателей. Величина единичной мощности серийно выпускаемых короткозамкнутых двигателей в этих странах за последние двадцать лет увеличилась в 10—15 раз и достигла в двухполюсном исполнении 15 000 квт, в четырехполюсном — 25 000 квт. Такой рост единичной мощности короткозамкнутых двигателей и расширение области применения для сверхмощных приводов, состояние которых во многих случаях определяет работоспособность всего предприятия, обусловлен известными их достоинствами. Но наряду с достоинствами короткозамкнутые двигатели имеют и ряд существенных недостатков, которые применительно к мощным и сверхмощным двигателям не только ограничивают, но иногда даже исключают возможность их использования. Таким недостатком является тяжелый режим пуска. Пуск таких двигателей при номинальном напряжении сопровождается действием недопустимо больших токов и ударных моментов, оказывающих весьма неблагоприятное влияние на двигатель, привод и всю энергосистему предприятия.

При этом возможности наиболее простых и экономичных систем облегченного пуска (реакторной, автотрансформаторной и т. п.) применительно к мощным двигателям весьма ограничены. Это обусловлено противоречивостью требований нормального пуска таких



двигателей: а) обеспечения необходимого пускового момента, б) исключения вредного влияния пусковых токов на энергосистему предприятий. По первому требованию ограничен предел допустимого снижения пускового тока, в то время как по второму ограничена сама величина пускового тока. При этом с увеличением мощности двигателей противоречивость этих требований возрастает. Исследованиями установлено, что при реальных соотношениях мощностей пускаемых двигателя и трансформаторов, обеспечить нормальный пуск двигателей свыше 5000 кВт данные системы практически не в состоянии.

Установлено также, что одной из наиболее рациональных, а следовательно, и перспективных систем облегченного пуска мощных и, особенно, сверхмощных короткозамкнутых двигателей, являются каскадные системы с разгонными двигателями, что подтверждается опытом зарубежных фирм. Каскадный пуск осуществляется при токах, близких к номинальным, благодаря чему обеспечиваются наилучшие условия работы как привода, так и энергосистемы предприятия. Но несмотря на то, что мощные и сверхмощные машины с разгонными двигателями, рассчитанными на каскадный пуск, фирмами выпускаются серийно, в зарубежной литературе представлены лишь некоторые частные результаты исследований этих систем и их описание, носящие преимущественно рекламный характер. Вместе с тем разработка и проектирование таких систем, как и разгонных двигателей для них, должны производиться на основе глубоких и всесторонних исследований электромеханических переходных процессов, протекающих в каскаде.

В реферируемой работе представлены методы и результаты исследования на ЭВМ электромеханических переходных процессов, протекающих в пусковых каскадных системах (ПКС) при условии постоянства параметров машин и с учетом вытеснения тока в роторах. Исследования переходных процессов с учетом вытеснения тока производились на основе представления широкополосной клетки в виде многозвенной цепной схемы с постоянными параметрами. Изложены аналитические и графоаналитические методы расчета механических переходных и установившихся процессов в ПКС, а также методы определения условий пуска приводов с короткозамкнутыми двигателями в каскаде и выбор мощности разгонного двигателя по каталожным данным серийных машин. Определена область практического использования пусковых каскадных систем и произведена их сравнительная экономическая оценка.

Разработанные методы исследования и расчета электромеханических переходных процессов в пусковых каскадах могут быть также использованы при исследовании и проектировании других электромашинных систем, которые найдут практическое применение в приводах машин и механизмов горной, нефтяной, газовой, химической и других отраслей промышленности.

Работа является развитием теории электромеханических переходных процессов в электромашинных системах с последовательно соединенными асинхронными двигателями.

## Глава I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ КАСКАДНОГО ПУСКА МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И СОСТОЯНИЕ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пусковые каскадные системы относятся к группе электромашинных систем с последовательным соединением машин переменного тока, отличительной особенностью которых, независимо от принадлежности и способа соединения обмоток, является непосредственная взаимосвязь и взаимообусловленность электромагнитных процессов, протекающих в них.

Возможность и простота реализации непосредственного и направленного взаимовлияния процессов в таких системах явились основанием для широкого практического их использования в качестве пусковых и рабочих каскадов. Данные системы могут быть классифицированы по следующим основным признакам:

1. По назначению.
2. По характеру связи между машинами.
3. По принадлежности связываемых обмоток.

При этом пусковые каскады, в свою очередь, классифицируются:

1. По способу перераспределения напряжения на машинах (т. е. по способу возбуждения рабочей машины в каскаде) — на системы:
  - а) с естественным перераспределением напряжения;
  - б) с принудительным перераспределением напряжения.
2. По типу рабочей машины — на системы пуска:
  - а) синхронных двигателей;
  - б) короткозамкнутых двигателей;
  - в) фазокомпенсаторов.
3. По типу вспомогательного двигателя — на системы:
  - а) с короткозамкнутым вспомогательным двигателем;
  - б) с асинхронным фазным двигателем.

В главе рассмотрены условия каскадного пуска асинхронных и синхронных машин с принудительным и естественным перераспределением напряжений. Установлено, что применительно к пуску короткозамкнутых двигателей наиболее рациональной является система с естественным перераспределением напряжений на машинах, осуществляемого путем применения разгонных двигателей с меньшим, чем у рабочей машины, числом пар полюсов.

Статические характеристики  $z_A = f(s_A)$  и  $z_B = f(s_B)$  жестко связанных двигателей, работающих в пусковом каскаде, имеют вид, представленный на рис. 1.

Очевидно, в любой рассматриваемый момент времени в течение всего периода разгона рабочей машины, при общем токе  $I_s$ , равном:

$$I_s = \frac{U_s}{z_{\partial A}(s) + z_{\partial B}(s)},$$



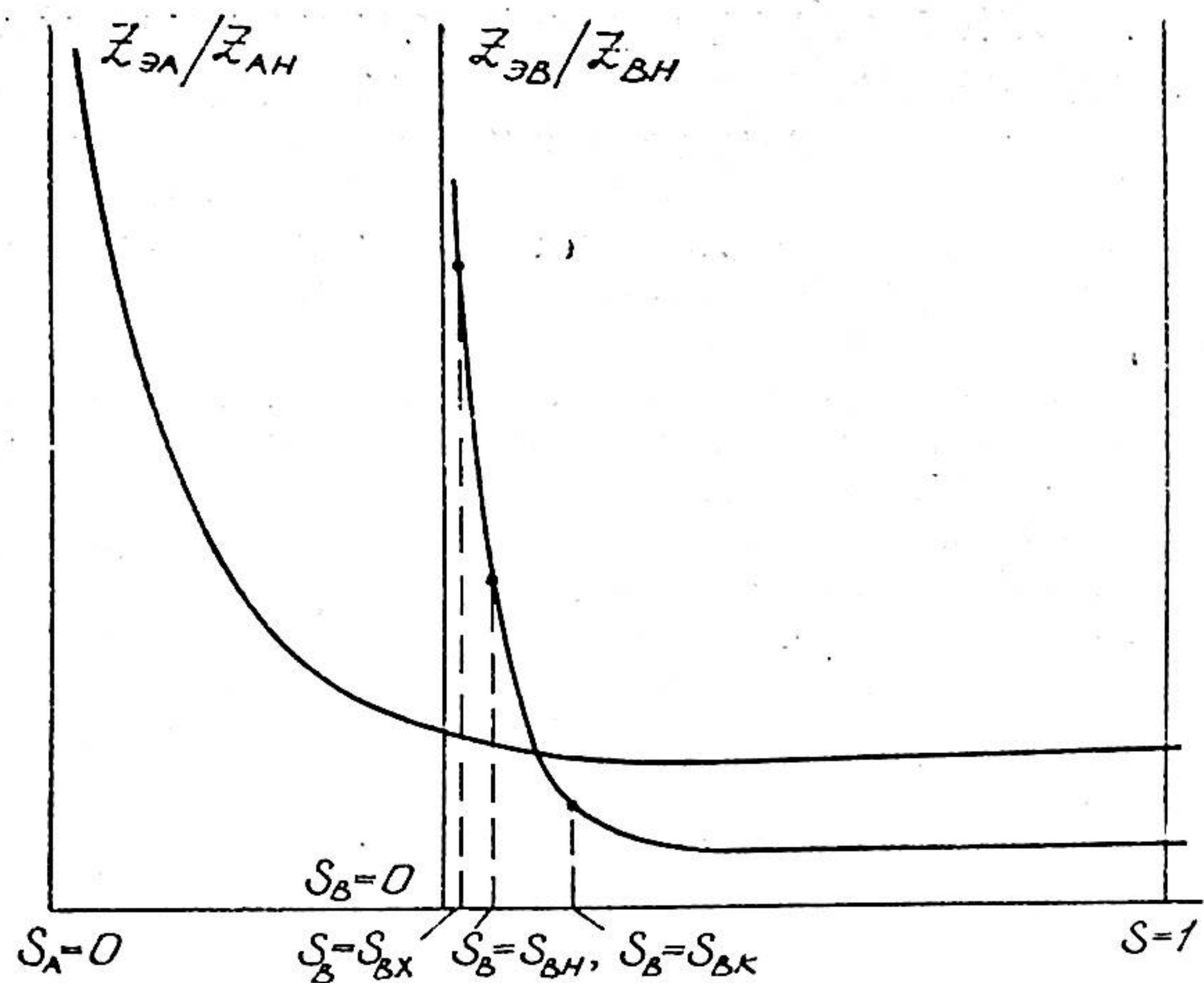


Рис. 1. Зависимости полных эквивалентных сопротивлений рабочего —  $Z_{ЭВ}$  и разгонного —  $Z_{ЭА}$  двигателей от скольжений.

напряжения на машинах  $\dot{U}_{SA}$  и  $\dot{U}_{SB}$  будут пропорциональны их полным сопротивлениям, т. е.:

$$\frac{\dot{U}_{SB}(s_B, s_A)}{\dot{U}_{SA}(s_A, s_B)} = \frac{Z_{ЭВ}(s_B)}{Z_{ЭА}(s_A)}$$

При стабильном напряжении на каскаде, равном  $\dot{U}_s$ , эти напряжения определяются выражениями:

$$\dot{U}_{SA} = \dot{U}_s \frac{Z_{ЭА}}{Z_{ЭА} + Z_{ЭВ}}$$

$$\dot{U}_{SB} = \dot{U}_s \frac{Z_{ЭВ}}{Z_{ЭА} + Z_{ЭВ}}$$

Идея использования для снижения пусковых токов каскадного (последовательного) соединения рабочей машины с разгонным двигателем принадлежит Розенбергу, которая была им материально воплощена в системе облегченного пуска одноякорных преобразователей и фазокомпенсаторов. Дальнейшим развитием и совершенствованием этой идеи явились изобретения Р. Рихтером асинхронных двигателей с улучшенными пусковыми характеристиками. В главе представлен краткий исторический обзор развития пусковых каскадных систем с момента изобретений Р. Рихтера до настоящего времени. Несмотря на некоторую разновидность этих систем, в том числе и запатентованных, все они созданы на основе

идеи Розенберга — Рихтера, пытавшихся воплотить свои идеи применительно к маломощным машинам в период бурного развития энергосистем.

Большое значение для выполнения реферируемой работы имело состояние теории асинхронных машин и каскадных систем, и в первую очередь методов исследования переходных процессов в них. Краткое описание основных этапов развития этой теории, выполненное на основе обзора отечественной и зарубежной литературы, представлено также в первой главе диссертации.

Подавляющее большинство работ как отечественных, так и зарубежных авторов посвящено разработке и результатам исследования переходных процессов в отдельных, индивидуально работающих асинхронных машинах. Исследованию же переходных процессов в электромашинных системах с последовательно соединенными асинхронными двигателями посвящено весьма ограниченное количество работ. Более того, даже установившиеся процессы в таких системах, исследование которых началось еще в 30-х годах, изучены еще далеко не достаточно.

К числу работ, излагающих общую теорию каскадных систем в установившемся режиме, в первую очередь следует отнести монографии М. П. Костенко и Гнедина, А. С. Сандлера, работы Л. Дрейфуса, Г. Крона, Р. Рихтера. Еще менее изучены процессы в электромашинных системах с последовательно соединенными асинхронными двигателями. Этому вопросу посвящена работа К. Ковача и И. Раца, в которой дано математическое описание процессов колебания трехфазных электрических валов, работы Л. Н. Грузова по методике математического описания процессов в каскадных системах на основе теории матричной алгебры и др.

Наименее изученными электромашинными системами с последовательно соединенными асинхронными двигателями, к началу выполнения настоящих исследований (1960 г.), были пусковые каскадные системы. Сведения об этих системах и методах их исследования ограничивались кратким описанием системы Р. Рихтером, Hailes и Mandel (ФРГ). Другие работы, посвященные пусковым каскадам, в основном носят сугубо описательный и даже рекламный характер. Особого внимания заслуживает работа немецких ученых из института электрических машин в Ганновере (ФРГ) доктора Г. Иордана, доктора Г. Бауша и ст. инженера М. Вайса «Переходные процессы при пуске трехфазных асинхронных машин с разгонными двигателями», опубликованная ими в журнале ETZ, 9, 1969, № 19 (ФРГ). В этой работе представлено математическое описание электромеханических переходных процессов при каскадном пуске короткозамкнутых двигателей с разгонными фазными двигателями. Приведены результаты исследования этих процессов на ЭВМ при околосинхронной скорости рабочего двигателя.

Таким образом, установившаяся в мировой практике тенденция развития мощного и сверхмощного электропривода на базе асинхронных короткозамкнутых двигателей, проблематичность пуска таких машин с использованием известных и применяемых



ныне: в СССР способов и средств, перспективность каскадных систем, а также состояние теории этих систем и определили цель настоящей работы.

Этой целью явилось проведение исследований и разработка методов расчета переходных процессов в каскадных системах пуска мощных и сверхмощных короткозамкнутых двигателей применительно к условиям практического их использования для разработки и проектирования таких систем.

## Глава II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПКС

Прежде чем приступить к математическому описанию электро-механических переходных процессов в ПКС, необходимо было определить условия протекания этих процессов и возможные допущения, обеспечивающие упрощение поставленной задачи.

Учитывая, что характер и направленность процессов в ПКС при заданных моментах сопротивления и номинальном напряжении на каскаде определяются величинами и соотношением параметров машин, в целях общности результатов анализа, была выбрана система с наибольшим диапазоном изменения скольжений. Такой системой, хотя и имеющей весьма ограниченную область практического применения, являются ПКС только с электрической связью двигателей. При этом для определения характера влияния режима одной машины на режим другой необходимо и достаточно рассмотреть процессы в ПКС при условиях, когда скольжения двигателей изменяются от  $S=0$  до  $S=1$ . В частности, были рассмотрены следующие режимы:

- идеальный холостой ход каскада ( $s_A = s_B = 0$ );
- изменение скольжения двигателя  $D_B$  от  $s_B = 0$  до  $s_B = 1$  при  $s_A = 0$ ;
- изменение скольжения двигателя  $D_A$  от  $s_A = 0$  до  $s_A = 1$  при  $s_B = 1$ .

На основании анализа этих режимов установлено, что независимо от мощности машин и их соотношения, процессы, протекающие в системе при изменении состояния хотя бы одной из них, всегда имеют строго определенную направленность.

А именно: изменение скольжения одной из машин, обуславливающее изменение э. д. с., тока и потока ее ротора, а следовательно, и тока системы, приводит к соответствующему изменению токов намагничивающей и вторичной цепей другой машины и, как следствие этого, к изменению ее э. д. с. и напряжения на ней.

Это весьма важное обстоятельство исключает возможность обособленного исследования процессов в отдельных машинах и обуславливает необходимость рассмотрения ПКС как единой электро-механической системы, в которой двигатели являются лишь ее элементами. Очевидно, что при одновременном изменении скольжений обеих машин физическая сущность явлений и характер вза-

имовления процессов в них не изменяются. Направленность процесса в системе будет при этом определяться величиной относительного изменения их скольжений.

В соответствии с условиями протекания процессов в ПКС, математическое описание электро-механических переходных процессов в них представлено в виде объединенных систем дифференциальных уравнений. В качестве переменных величин в эти уравнения вошли напряжения, токи, потоки и моменты машин. Установлено, что наиболее простым и рациональным методом получения такой системы уравнений является метод, основанный на применении матричной алгебры.

### Дифференциальные уравнения ПКС при условии постоянства параметров машин

Математическое описание электро-механических переходных процессов в ПКС при условии постоянства параметров машин, выполненное на основе применения матричной алгебры, в работе представлено системой дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, в которых пространственные векторы  $\bar{U}_A$ ,  $\bar{i}_A$  и  $\bar{U}_B$ ,  $\bar{i}_B$  могут быть выражены в любой системе координат, при неизменности их модулей и направлений. Данная система уравнений с комплексными неизвестными  $\bar{i}_S$ ,  $\bar{i}_{rA}$  и  $\bar{i}_{rB}$  представлена следующими выражениями:

$$\begin{cases} \bar{U}_S = Z_S \bar{i}_S + r(x_S \bar{i}_S + x_{mA} \bar{i}_{rA} + x_{mB} \bar{i}_{rB}) + j\omega_K(x_S \bar{i}_S + x_{mA} \bar{i}_{rA} + x_{mB} \bar{i}_{rB}), \\ 0 = Z_{rA} \bar{i}_{rA} + r(x_{mA} \bar{i}_S + x_{rA} \bar{i}_{rA}) + j(\omega_K - \omega_A)(x_{mA} \bar{i}_S + x_{rA} \bar{i}_{rA}), \\ 0 = Z_{rB} \bar{i}_{rB} + r(x_{mB} \bar{i}_S + x_{rB} \bar{i}_{rB}) + j(\omega_K - \omega_B)(x_{mB} \bar{i}_S + x_{rB} \bar{i}_{rB}), \end{cases}$$

где  $r_S = r_{SA} + r_{SB}$ ,  $x_S = x_{SA} + x_{SB}$ , а относительная скорость разгонного двигателя  $\omega_A$  равна:

$$\omega_A = \frac{p_A}{p_B} \omega_B.$$

Не менее двух из этих уравнений, представленные в осях при  $\omega_K = 0$ ,  $\omega_K = 1$  или  $\omega_K = \omega_0$ , будут нелинейными.

Уравнение движения ПКС с разгонным двигателем имеет вид:

$$p\omega_B = \frac{1}{J_\Sigma} (M - M_c).$$

При этом суммарный электро-магнитный момент ПКС определяется следующим выражением:



$$M = \frac{P_A}{P_B} X_{mA} \gamma_m [\bar{I}_S \bar{I}'_{2A}] + X_{mB} \gamma_m [\bar{I}_S \bar{I}'_{2B}] =$$

$$= \frac{P_A}{P_B} X_{mA} \operatorname{Re}[j \bar{I}'_S \bar{I}'_{2A}] + X_{mB} \operatorname{Re}[j \bar{I}'_S \bar{I}'_{2B}].$$

Уравнения движения машин, работающих в каскаде только с электрической связью, имеют следующий вид:

$$p\omega_A = \frac{1}{T_A} (M_A - M_{CA});$$

$$p\omega_B = \frac{1}{T_B} (M_B - M_{CB}),$$

где  $M_{CA} = f_1(\omega_A)$ ,  $M_{CB} = f_2(\omega_B)$  — моменты сопротивления двигателей в функции скоростей.

Уравнения, описывающие электромагнитные переходные процессы в ПКС, на основе которых построена схема замещения для этих режимов, в преобразованном виде имеют вид:

$$\begin{cases} \bar{U}_S = z_S \bar{I}_S + p \bar{\Psi}_{SA} + p \bar{\Psi}_{SB} + j\omega_K (\bar{\Psi}_{SA} + \bar{\Psi}_{SB}); \\ 0 = z_{2A} \bar{I}'_{2A} + p \bar{\Psi}_{2A} + j(\omega_K - \omega_A) \bar{\Psi}_{2A}; \\ 0 = z_{2B} \bar{I}'_{2B} + p \bar{\Psi}_{2B} + j(\omega_K - \omega_B) \bar{\Psi}_{2B}. \end{cases}$$

Уравнения установившегося режима ПКС после всех преобразований представлены в следующем виде:

$$\bar{U}_S = z_{SA} \bar{I}'_S + z_{SB} \bar{I}'_S + jx_{1A} \bar{I}'_S + jx_{mA} (\bar{I}'_S + \bar{I}'_{2A}) + jx_{1B} \bar{I}'_S + jx_{mB} (\bar{I}'_S + \bar{I}'_{2B});$$

$$0 = \frac{z_{2A}}{s_A} \bar{I}'_{2A} + jx_{mA} (\bar{I}'_S + \bar{I}'_{2A}) + jx'_{2A} \bar{I}'_{2A}$$

$$0 = \frac{z_{2B}}{s_B} \bar{I}'_{2B} + jx_{mB} (\bar{I}'_S + \bar{I}'_{2B}) + jx'_{2B} \bar{I}'_{2B}.$$

В работе представлены выражения, определяющие ток каскада, потокосцепления, токи роторов и намагничивающих ветвей обеих машин.

Электромагнитные моменты рабочего и разгонного двигателей определяются выражениями:

$$M_A = \frac{P_A}{P_B} \cdot \frac{K_{2A}}{X'_{SA}} \operatorname{Re}[j \bar{\Psi}'_{SA} \bar{\Psi}'_{2A}];$$

$$M_B = \frac{K_{2B}}{X'_{SB}} \operatorname{Re}[j \bar{\Psi}'_{SB} \bar{\Psi}'_{2B}].$$

Напряжения на двигателях через ток каскада, параметры и коэффициенты затухания роторов определяются, соответственно:

$$\bar{U}_{SA} = [z_{SA} + j \frac{X'_{SA}(\alpha'_{2A} + j s_A)}{(\alpha'_{2A} + j s_A)}] \bar{I}'_S;$$

$$\bar{U}_{SB} = [z_{SB} + j \frac{X'_{SB}(\alpha'_{2B} + j s_B)}{(\alpha'_{2B} + j s_B)}] \bar{I}'_S.$$

При этом геометрические места определяются: тока каскада — кривой четвертого порядка, а напряжение на двигателях, потокосцеплений, токов роторов и намагничивающих токов — кривыми шестого порядка относительно скольжения рабочего двигателя.

### Исследование процессов в глубокопазных двигателях на основе многозвенной цепной схемы замещения роторов

Известно, что исследование и расчет переходных процессов с учетом вытеснения тока в роторе методом кусочно-линейной аппроксимации компонент полного сопротивления в функции скорости, даже при изменении последних по линейному закону, отличается значительной трудоемкостью. При расчете переходных процессов данным методом на АВМ это обуславливает необходимость использования сложной блок-схемы, при относительно низкой точности результатов.

На основании анализа результатов проведенных исследований и расчетов переходных и установившихся процессов в глубокопазных двигателях, выполненных различными методами, установлено, что наиболее рациональным из них, обеспечивающим одновременный учет изменения  $r=f(s)$  и  $x=f(s)$ , является метод, основанный на замене глубокопазного ротора многозвенной цепной схемой с постоянными параметрами звеньев.

Сравнение результатов всех расчетов позволило сделать вывод, что данный метод, даже при замене ротора с вытеснением тока эквивалентным двухклеточным при постоянных параметрах клеток, рассчитанных при базисных скольжениях 0,5 ÷ 1, независимо от формы и относительных размеров паза, обеспечивает вполне достаточную точность расчетов.

### Уравнения ПКС с учетом изменения параметров роторов

Описание переходных процессов в ПКС с учетом изменения параметров обеих машин, выполненное на основе замены глубокопазных роторов эквивалентными двухклеточными с применением элементов матричной алгебры, представлено уравнениями, которые после соответствующих преобразований будут иметь следующий вид:



$$\left\{ \begin{aligned} \bar{U}_S &= \bar{L}_S \bar{z}_S + \rho \bar{\Psi}_{SB} + \rho \bar{\Psi}_{SA} + j\omega_K (\bar{\Psi}_{SA} + \bar{\Psi}_{SB}); \\ 0 &= \bar{L}_{BA} R_{BA} + \rho \bar{\Psi}_{BA} + j(\omega_K - \omega_A) \bar{\Psi}_{BA}; \\ 0 &= \bar{L}_{HA} R_{HA} + \rho \bar{\Psi}_{HA} + j(\omega_K - \omega_A) \bar{\Psi}_{HA}; \\ 0 &= \bar{L}_{BB} R_{BB} + \rho \bar{\Psi}_{BB} + j(\omega_K - \omega_B) \bar{\Psi}_{BB}; \\ 0 &= \bar{L}_{HB} R_{HB} + \rho \bar{\Psi}_{HB} + j(\omega_K - \omega_B) \bar{\Psi}_{HB}. \end{aligned} \right.$$

Момент каскада определяется выражением:

$$M = \frac{P_A}{P_R} \chi_{тА} \operatorname{Re} [j \bar{L}_S^* (\bar{L}_{BA} + \bar{L}_{HA})] + \chi_{тВ} \operatorname{Re} [j \bar{L}_S^* (\bar{L}_{HB} + \bar{L}_{BB})].$$

В работе представлена схема замещения ПКС с широкополосными двигателями при замене их эквивалентными двухклеточными, обеспечивающая возможность исследования переходных процессов.

Уравнения установившегося режима ПКС представлены следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{U}_S &= z_S \dot{I}_S + j\omega_1 \Psi_{SA} + j\omega_1 \Psi_{SB}; \\ 0 &= R_{BA} \dot{I}_{BA} + j\omega_1 S_A \Psi_{BA}; \\ 0 &= R_{HA} \dot{I}_{HA} + j\omega_1 S_A \Psi_{HA}; \\ 0 &= R_{BB} \dot{I}_{BB} + j\omega_1 S_B \Psi_{BB}; \\ 0 &= R_{HB} \dot{I}_{HB} + j\omega_1 S_B \Psi_{HB}. \end{aligned}$$

На основе уравнений установившегося режима построена схема замещения ПКС и представлены выражения, определяющие геометрические места э. д. с., токов и напряжений, действующих в них.

### Глава III. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Аналитическое решение систем дифференциальных уравнений, описывающих электромеханические переходные процессы в ПКС без применения ЭВМ, практически невозможно. В ряде же случаев и, в частности, при проектировании систем на базе серийных машин инженерные расчеты переходных процессов, как правило, сводятся к расчету механических переходных процессов, описываемых дифференциальными уравнениями движения. При этом в зависимости от типа каскадной системы исследование переходных процессов в них предполагает решение следующих основных задач:

а) в системах с разгонными двигателями — определение зависимости  $s=f(t)$ , времени переходного процесса и закономерности изменения момента каскада.

б) в системах только с электрической связью — определение зависимости скольжения двигателей от времени  $s_A=f(t)$ ,  $s_B=f(t)$ , зависимости между скольжениями двигателей  $s_A=f(s_B)$ , времени переходного процесса, а также определения закономерности изменения моментов рабочего и вспомогательного двигателей в функции времени.

А. Аналитические методы расчета переходных процессов в ПКС с разгонными двигателями при  $M_C=0$

В соответствии с полной схемой замещения каскада его момент определяется следующим выражением:

$$M = m_1 \left[ \frac{(1-\sigma_A) \alpha_{2A} \chi_{SA} S_A}{\omega_{0A} (\alpha_{2A}^2 + S_A^2)} + \frac{(1-\sigma_B) \alpha_{2B} \chi_{SB} S_B}{\omega_{0B} (\alpha_{2B}^2 + S_B^2)} \right] I_S^2$$

Учитывая связь между скольжениями и скоростями двигателей,

$$\frac{\omega_{0A}}{\omega_{0B}} = v; \quad S_A = \frac{v-1+S_B}{v},$$

выражение момента может быть представлено в виде:

$$M = \frac{m_1}{\omega_0} \left[ \frac{(1-\sigma_A)(v-1+S) \alpha_{2A} \chi_{SA}}{\alpha_{2A}^2 v^2 + (v-1+S)^2} + \frac{(1-\sigma_B) \alpha_{2B} \chi_{SB}}{\alpha_{2B}^2 + S^2} \right] I_S^2$$

Установлено, что расчет момента по данному выражению является весьма громоздкой и трудоемкой операцией, поэтому с вполне допустимой погрешностью последний может быть рассчитан на основе упрощенной схемы замещения:

$$M = \frac{m_1 U_S^2}{\omega_0} \frac{\frac{z'_{2A}}{v-1+S} + \frac{z'_{2B}}{S}}{\left[ (z'_S - \frac{v z'_{2A}}{v-1+S} + \frac{z'_{2B}}{S})^2 + \chi^2 \right]}.$$

Сравнение результатов расчета момента каскадов, выполненных на основе полной и упрощенной схем замещения, показало, что погрешность упрощенного метода составляет  $7 \div 10\%$  и проявляется лишь в узкой области критического скольжения.

На основе данного выражения момента и уравнения движения каскада при  $M_C=0$  получено выражение для определения времени разгона каскада от  $s_1$  до  $s_2$ :

$$\begin{aligned} t_0 &= \frac{J \omega_0}{m_1 U_S^2} \left\{ \left[ \frac{S_1^2 - S_2^2}{2z'_2} + \frac{z'_{2A}(v-1)(S_1 - S_2)}{z_2'^2} \right] (z_2'^2 + \chi^2) + \right. \\ &+ 2z'_S \frac{(v - z'_{2A} + z'_{2B})(S_1 - S_2)}{z_2'} z'_{2B} \ln \frac{S_1}{S_2} + z'_{2A} v^2 \ln \frac{S_1 + v - 1}{S_2 + v - 1} - \\ &\left. - \frac{z'_{2A} z'_{2B} (v-1)^2}{z_2'} \ln \frac{S_1 z_2' + z'_{2B} (v-1)}{S_2 z_2' + z'_{2B} (v-1)} \left( \frac{z_2'^2 + \chi^2}{z_2'^2} + \frac{2z'_S}{z_2'} + 1 \right) \right\} \end{aligned}$$



Произведено упрощение данного выражения путем введения условных эквивалентных параметров каскада, которые определяются следующими зависимостями:

$$M_k = \frac{m l s^2}{2 \omega_0 X}; \quad S_k = \frac{z'_{22}}{X}; \quad \varepsilon = \frac{R_1}{X};$$

$$S_{KA} + S_{KB} = S_k,$$

где  $M_k, S_k$  — соответственно, критический момент и критическое скольжение эквивалентного двигателя;

а

$$S_{KA} = \frac{z'_{2A}}{X}; \quad S_{KB} = \frac{z'_{2B}}{X}.$$

При этих условиях время разгона каскада от  $s=s_1$  до  $s=s_2$  определяется выражением:

$$t_0 = \frac{\gamma \omega_0}{2 M_k} \left\{ \left[ \frac{s_1^2 - s_2^2}{2 S_k} + \frac{S_{KA}(\nu-1)(s_1 - s_2)}{S_k^2} \right] (\varepsilon^2 + 1) + \frac{2 \varepsilon (\nu S_{KA} + S_{KB})(s_1 - s_2)}{S_k} \right\} \times$$

$$\times S_{KB} \ln \frac{s_1 + S_{KA} \nu^2 \ln \frac{s_1 + \nu - 1}{s_2 + \nu - 1} - \frac{[(S_k + \varepsilon)^2 + 1](\nu-1)^2 S_{KA} S_{KB}}{S_k^3} \ln \frac{s_1 S_k + S_{KB}(\nu-1)}{s_2 S_k + S_{KB}(\nu-1)} \Bigg\}$$

а от  $s=1$  до  $s=0$  при дополнительном упрощении:

$$t_{on} = \frac{\gamma \omega_0}{2 M_k} \left\{ \left[ \frac{1}{2 S_k} + \frac{S_{KA}(\nu-1)}{S_k^2} \right] (\varepsilon^2 + 1) + S_{KB} \ln 100 + S_{KA} \nu^2 \ln \frac{\nu}{\nu-1} - \right.$$

$$\left. - \frac{[(S_k + \varepsilon)^2 + 1](\nu-1)^2 S_{KA} S_{KB}}{S_k^3} \ln \left| \frac{S_k}{S_{KB}(\nu-1)} + 1 \right| \right\}.$$

Величина погрешности результатов расчетов времени каскадного пуска по данным формулам относительно расчета с использованием полной схемы замещения не превышает 5%.

В работе определены зависимости времени переходного процесса при разгоне каскада от величины критического скольжения  $s_k$ , которые представлены в виде  $t_0 / I_0 \frac{\omega_0}{M_k} = t(s_k)$ .

Определена степень влияния на расчетное время разгона различных коэффициентов и на основе этого сделаны допущения, еще более упрощающие выражение времени переходного процесса, которое при этом определяется:

$$t_{on} = \frac{\gamma \omega_0}{2 M_{k\bar{\varepsilon}}} \left( \frac{2\nu-1}{2 S_k} + S_k \nu^2 \ln \frac{\nu}{\nu-1} \right)$$

Данное упрощенное выражение обеспечивает погрешность результатов не более 8%.

## Б. Методы расчета переходных процессов ПКС при $M_c = \text{const}$

В работе представлен общий случай решения уравнения движения каскада применительно к данным условиям, в котором момент каскада через его эквивалентные параметры определяется следующим выражением:

$$M = 2 M_{k\bar{\varepsilon}} \frac{\frac{S_{KA}}{\nu-1+S} + \frac{S_{KB}}{S}}{\left( \varepsilon + \frac{\nu S_{KA}}{\nu-1+S} + \frac{S_{KB}}{S} \right)^2 + 1}$$

Решение имеет вид:

$$t = \frac{\gamma \omega_0}{M_c} \int_{s_1}^{s_2} \left( 1 + \frac{as^3 + bs^2 + cs}{ds^4 + es^3 + fs^2 + gs + h} \right) ds.$$

Представлены также выражения для приближенных расчетов времени разгона каскада при условии, что  $\nu \leq 1,5$ , которое имеет следующий вид:

$$t_n = \frac{\gamma \omega_0}{M_c} \left[ a' \ln \left| \frac{Sc_1}{Sc_1 - 1} \right| + \frac{b' + c' Sc_4}{Sc_1 - Sc_4} \ln \left| \frac{Sc_1(Sc_4 - 1)}{Sc_4(Sc_1 - 1)} \right| - 1 \right].$$

## В. Методы расчета переходных процессов ПКС при $M_c = f(\omega)$

Выражение момента каскада в этом случае удобно представлять в следующем виде:

$$M = 2 M_{k\bar{\varepsilon}} \frac{\frac{S_{KA}}{\nu-1+S} + \frac{S_{KB}}{S}}{\left[ \left( \varepsilon + \frac{\nu S_{KA}}{\nu-1+S} + \frac{S_{KB}}{S} \right)^2 + 1 \right]} = 2 M_{k\bar{\varepsilon}} \frac{D}{E}.$$

Тогда время переходного процесса определится выражением:

$$t = - \frac{\gamma \omega_0}{M_H} \int_{s_1}^{s_2} \frac{Q_4(s) ds}{2 m_{k\bar{\varepsilon}} Q_3(s) - m_0 Q_4(s) - Q_4(s)(1-s)^{4-m_0} k},$$

где  $m_0 = \frac{M_0}{M_H}$ ,  $m_{k\bar{\varepsilon}} = \frac{M_{k\bar{\varepsilon}}}{M_H}$  — относительные значения моментов;

$Q_{ns}$  — многочлены степени  $n$  относительно  $s$ ;

$k$  — коэффициент нагрузки при номинальной скорости.

Предложено решение данного уравнения в элементарных функциях путем разложения подынтегрального выражения на сумму простейших дробей.



Г. Расчет переходных процессов при  $M_c=0$  с учетом изменения параметров разгонного двигателя

Установлено, что одним из рациональных типов разгонного двигателя для пусковых каскадных систем является глубокопазный двигатель со значительным коэффициентом вытеснения тока в роторе и повышенным удельным сопротивлением материала клетки.

Учитывая, что время пуска каскада в основном определяется величиной момента разгонного двигателя, изменением сопротивления клетки ротора рабочего двигателя вследствие вытеснения тока, можно пренебречь, принимая его постоянным при  $s=1$ . Расчеты переходных процессов, выполненные на АВМ по полным дифференциальным уравнениям, подтвердили возможность данного допущения. При этих условиях уравнение момента каскада определится следующим выражением:

$$M = \frac{m U_s^2}{\omega_0 A} \cdot \frac{\frac{R_{3A}}{S_A} + \frac{z_{2B}''}{S_A + W - 1}}{\left( z_S + \frac{R_{3A}}{S_A} + \frac{z_{2B}'' W}{S_A + W - 1} \right)^2 + (X + X_{3A})^2},$$

где

$$X = X'_{SA} + X'_{SB} + X''_{2B} + X_{06A}, \quad W = \frac{1}{\sigma}; \quad z_S = z_{3A} + z_{2B};$$

$$R_{3A} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 S_A^2}{\alpha_3 + \alpha_4 S_A^2}; \quad X_{3A} = \frac{\alpha_5}{\alpha_3 + \alpha_4 S_A^2};$$

$$\alpha_1 = R'_{6A} R'_{HA} R'_{2A}; \quad \alpha_2 = R'_{6A} X'_{HA}; \quad \alpha_3 = R'_{2A}; \quad \alpha_4 = X'^2_{HA};$$

$$\alpha_5 = R'_{6A} X'_{HA}; \quad R'_{2A} = R'_{6A} + R'_{HA}.$$

Тогда после выполнения всех преобразований и возможных упрощений время переходного процесса определится следующим выражением:

$$t_0 = \frac{J \omega_0 A}{m U_s^2} \left\{ \frac{\alpha_4 X^2 (S_{1A}^2 - S_{2A}^2)}{2n} + \frac{X}{2n} \left[ (\alpha_3 - \alpha_4 \frac{m}{n}) + 2\alpha_5 \right] X \right.$$

$$\times \ell \left[ \frac{S_{1A}^2 + \frac{m}{n}}{S_{2A}^2 + \frac{m}{n}} + \frac{(W-1) z_{2B}'' X^2 (S_{1A} - S_{2A})}{z_2^2} - \frac{R_{3A} z_{2B}'' (W-1)^2 X^2}{z_2^3} \right] X$$

$$\times \ell \left[ \frac{S_{1A} + \frac{R_{3A}}{z_2} (W-1)}{S_{2A} + \frac{R_{3A}}{z_2} (W-1)} + 2 z_S (S_{1A} - S_{2A}) + R_{3A} \ell \frac{S_{1A}}{S_{2A}} \right],$$

где  $z_2 = R_{3A} + z_{2B}''; \quad n = \alpha_2 + z_{2B}'' \alpha_4; \quad m = \alpha_1 + z_{2B}'' \alpha_5.$

Расхождение результатов аналитического расчета времени пуска двигателей в каскаде с результатами моделирования составляет 5%.

Д. Графоаналитические методы расчета переходных процессов в ПКС

В работе представлены простейшие графоаналитические методы расчетов переходных процессов в ПКС, которые могут быть использованы как при расчете систем только с электрической связью, так и систем с разгонными двигателями. При этом по условиям протекания процессов в ПКС, к числу которых относится закономерность изменения соотношения скольжений машин, система с разгонными двигателями может рассматриваться, как частный случай системы только с электрической связью. Изложенный в работе графоаналитический метод последовательных интервалов с использованием схем замещения ПКС обеспечивает возможность одновременного определения всех величин, характеризующих состояние процесса при разгоне машины в каскаде, а именно: скольжений, напряжений, токов и моментов. При этом решения переходного процесса представляются в виде графических зависимостей  $s_A = f(t)$ ,  $s_B = f(t)$ ,  $M_A, M_B = f(s)$ . В работе представлен также графоаналитический метод определения зависимости  $s_A = f(s_B)$  в каскадах только с электрической связью.

Глава IV. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПКС С ЦЕЛЮ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ НА АВМ

В работе использован один из наиболее рациональных методов исследования переходных процессов в симметричных асинхронных машинах, основанный на приведении их к эквивалентным двухфазным, обеспечивающий при значительном упрощении систем дифференциальных уравнений, необходимую полноту и достаточную точность результатов их решения.

Преобразование уравнений при условии постоянства параметров машин

Уравнения, описывающие электромеханические переходные процессы в ПКС, при условии постоянства параметров машин при выражении результирующих пространственных векторов  $\vec{i}_s, \vec{i}_{rA}$  и  $\vec{i}_{rB}$  через их составляющие представлены в следующем виде:



*[Faint handwritten text at the top of the page]*

*[Faint handwritten text in the middle section]*

Рассмотрим уравнение системы вращающегося поля статора и ротора в системе координат, связанной с магнитной осью статора. Векторы напряжений и токов в статоре и роторе можно записать в виде:

$$\vec{U}_s = U_s \cos(\omega t) \vec{e}_s$$

$$\vec{U}_r = U_r \cos(\omega t - \alpha) \vec{e}_r$$

где  $\vec{e}_s$  и  $\vec{e}_r$  — единичные векторы, направленные по магнитной оси статора и ротора соответственно. Угол  $\alpha$  — угол между осями статора и ротора.

$$M_{12} = \frac{1}{2} (M_{11} + M_{22}) \cos 2\alpha, \quad M_{13} = \frac{1}{2} (M_{11} - M_{22}) \sin 2\alpha, \quad M_{23} = M_{13} \tan 2\alpha$$

В соответствии с поставленной задачей были рассмотрены системы уравнений, в которые переменными вошли:

- токи статора и ротора  $(\vec{i}_s, \vec{i}_r)$ ;
- токи и потоки роторов  $(\vec{i}_a, \vec{i}_b, \vec{i}_c, \vec{\psi}_a, \vec{\psi}_b, \vec{\psi}_c)$ ;

В соответствии с поставленной задачей были рассмотрены системы уравнений, в которые переменными вошли:

$$M_{12} = \frac{1}{2} (M_{11} + M_{22}) \cos 2\alpha, \quad M_{13} = \frac{1}{2} (M_{11} - M_{22}) \sin 2\alpha, \quad M_{23} = M_{13} \tan 2\alpha$$

$$M_{12} = \frac{1}{2} (M_{11} + M_{22}) \cos 2\alpha, \quad M_{13} = \frac{1}{2} (M_{11} - M_{22}) \sin 2\alpha, \quad M_{23} = M_{13} \tan 2\alpha$$

$$M_{12} = \frac{1}{2} (M_{11} + M_{22}) \cos 2\alpha, \quad M_{13} = \frac{1}{2} (M_{11} - M_{22}) \sin 2\alpha, \quad M_{23} = M_{13} \tan 2\alpha$$

$$M_{12} = \frac{1}{2} (M_{11} + M_{22}) \cos 2\alpha, \quad M_{13} = \frac{1}{2} (M_{11} - M_{22}) \sin 2\alpha, \quad M_{23} = M_{13} \tan 2\alpha$$

$$M_{12} = \frac{1}{2} (M_{11} + M_{22}) \cos 2\alpha, \quad M_{13} = \frac{1}{2} (M_{11} - M_{22}) \sin 2\alpha, \quad M_{23} = M_{13} \tan 2\alpha$$

$$M_{12} = \frac{1}{2} (M_{11} + M_{22}) \cos 2\alpha, \quad M_{13} = \frac{1}{2} (M_{11} - M_{22}) \sin 2\alpha, \quad M_{23} = M_{13} \tan 2\alpha$$

$$M_{12} = \frac{1}{2} (M_{11} + M_{22}) \cos 2\alpha, \quad M_{13} = \frac{1}{2} (M_{11} - M_{22}) \sin 2\alpha, \quad M_{23} = M_{13} \tan 2\alpha$$

$$M_{12} = \frac{1}{2} (M_{11} + M_{22}) \cos 2\alpha, \quad M_{13} = \frac{1}{2} (M_{11} - M_{22}) \sin 2\alpha, \quad M_{23} = M_{13} \tan 2\alpha$$

**Преобразование уравнений ПКС с учетом выпесенных токов в роторах**

Система уравнений, описывающая процессы в ПКС с учетом выпесенных токов в роторах обеих дмитателей после всех необходи-



мых преобразований в синхронно вращающихся осях  $u-v$ , будет иметь вид:

$$p i_{su} = \frac{1}{X_{SK}} [-\zeta_s i_{su} + X'_{SK} i_{sv} + K_{GA} K_{SA} \omega_A \psi_{GUA} - K_{GA} K_{SA} \alpha'_{GA} \psi_{SUA} + K_{GA} K_{SA} \alpha'_{GA} (1 + \sigma_{2A}) \psi_{GUA} - K_{GA} K_{SA} \alpha'_{GA} \sigma_{2A} \psi_{HUA} + K_{GB} K_{SB} \omega_B \psi_{GUB} - K_{GB} K_{SB} \alpha'_{GB} \psi_{SUB} + K_{GB} K_{SB} \alpha'_{GB} (1 + \sigma_{2B}) \psi_{GUB} - K_{GB} K_{SB} \alpha'_{GB} \sigma_{2B} \psi_{HUB} - U_{su}] ;$$

$$p i_{sv} = \frac{1}{X_{SK}} [-\zeta_s i_{sv} - X'_{SK} i_{su} - K_{GA} K_{SA} \omega_A \psi_{GUA} - K_{GA} K_{SA} \alpha'_{GA} \psi_{SUA} + K_{GA} K_{SA} \alpha'_{GA} (1 + \sigma_{2A}) \psi_{GUA} - K_{GA} K_{SA} \alpha'_{GA} \sigma_{2A} \psi_{HUA} - K_{GB} K_{SB} \omega_B \psi_{GUB} - K_{GB} K_{SB} \alpha'_{GB} \psi_{SUB} + K_{GB} K_{SB} \alpha'_{GB} (1 + \sigma_{2B}) \psi_{GUB} - K_{GB} K_{SB} \alpha'_{GB} \sigma_{2B} \psi_{HUB} + U_{sv}] ;$$

$$p \psi_{GUA} = \alpha'_{GA} \psi_{SUA} - \alpha'_{GA} (1 + \sigma_{2A}) \psi_{GUA} + \alpha'_{GA} \sigma_{2A} \psi_{HUA} + (1 - \omega_A) \psi_{GUA} ;$$

$$p \psi_{GUA} = \alpha'_{GA} \psi_{SUA} - \alpha'_{GA} (1 + \sigma_{2A}) \psi_{GUA} + \alpha'_{GA} \sigma_{2A} \psi_{HUA} - (1 - \omega_A) \psi_{GUA} ;$$

$$p \psi_{HUA} = \alpha'_{HA} \psi_{GUA} - \alpha'_{HA} \psi_{HUA} + (1 - \omega_A) \psi_{HUA} ;$$

$$p \psi_{HUA} = \alpha'_{HA} \psi_{GUA} - \alpha'_{HA} \psi_{HUA} - (1 - \omega_A) \psi_{HUA} ;$$

$$p \psi_{GUB} = \alpha'_{GB} \psi_{SUB} - \alpha'_{GB} (1 + \sigma_{2B}) \psi_{GUB} + \alpha'_{GB} \sigma_{2B} \psi_{HUB} + (1 - \omega_B) \psi_{GUB} ;$$

$$p \psi_{GUB} = \alpha'_{GB} \psi_{SUB} - \alpha'_{GB} (1 + \sigma_{2B}) \psi_{GUB} + \alpha'_{GB} \sigma_{2B} \psi_{HUB} - (1 - \omega_B) \psi_{GUB} ;$$

$$p \psi_{HUB} = \alpha'_{HB} \psi_{GUB} - \alpha'_{HB} \psi_{HUB} + (1 - \omega_B) \psi_{HUB} ;$$

$$p \psi_{HUB} = \alpha'_{HB} \psi_{GUB} - \alpha'_{HB} \psi_{HUB} - (1 - \omega_B) \psi_{HUB} ;$$

$$\psi_{SUA} = X'_{SA} i_{su} + K_{GA} K_{SA} \psi_{GUA} ; \quad \psi_{SUA} = X'_{SA} i_{sv} + K_{GA} K_{SA} \psi_{GUA} ;$$

$$\psi_{SUB} = X'_{SB} i_{su} + K_{GB} K_{SB} \psi_{GUB} ; \quad \psi_{SUB} = X'_{SB} i_{sv} + K_{GB} K_{SB} \psi_{GUB} ;$$

$$M_K = \frac{P_A}{P_B} \cdot \frac{K_{GA} K_{SA}}{X_{SA}} (\psi_{GUA} \psi_{SUA} - \psi_{SUA} \psi_{GUA}) + \frac{K_{GA} K_{SB}}{X_{SB}} (\psi_{GUB} \psi_{SUB} - \psi_{SUB} \psi_{GUB}) ;$$

$$p \omega_B = \frac{1}{J_{\Sigma}} (M_K - M_C) ; \quad \omega_A = \frac{P_A}{P_B} \omega_B .$$

### Уравнения ПКС с учетом изменения параметров только разгонного двигателя

Учитывая, что относительная величина момента, развиваемого рабочим двигателем в процессе его разгона от  $s_B = 1$  до  $s_B = 0$ , при напряжении на нем  $0,2 \div 0,25$  и.н., весьма незначительная, влиянием

изменения его параметров на переходный процесс в каскаде с вполне допустимой погрешностью часто можно пренебречь и принимать их значения постоянными при  $S = 1$ . С учетом этих допущений в работе представлены преобразованные системы уравнений, описывающие электромеханический переходный процесс в каскаде как в неподвижных ( $\alpha-\beta$ ), так и синхронно вращающихся ( $u-v$ ) осях.

Благодаря тому, что изменение индуктивного сопротивления ротора влияет на динамику пуска значительно меньше, чем изменение его активного сопротивления, оказалось возможным еще более упростить систему уравнений и структурную схему моделей ПКС. Приняв значения индуктивного сопротивления ротора разгонного двигателя постоянными при  $s = 1$  и ускорение каскада также постоянным, после всех необходимых преобразований были получены системы уравнений, представленные в осях  $u-v$  и  $\alpha-\beta$ , которые могут быть использованы на первой стадии разработки разгонных двигателей.

## Глава V. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПКС

### Исследование переходных процессов в ПКС на АВМ

Основной задачей исследования электромеханических переходных процессов на АВМ явилось определение степени влияния параметров, соотношение мощностей и чисел пар полюсов двигателей, а также моментов сопротивления и инерции на характер процессов в ПКС. Эта задача обусловила необходимость моделирования значительного количества каскадных систем при мощности рабочего двигателя от 20 до 8000 кВт, с соотношением чисел пар полюсов  $\nu = 1,2 \div 4$ . Исследование проводилось на АВМ ЭМУ-10. Результаты исследований представлены в работе в виде соответствующих осциллограмм и таблиц.

На основании анализа всех результатов установлено следующее. Момент инерции системы оказывает существенное влияние на характер процесса только в области около синхронной скорости рабочего двигателя. С увеличением соотношения числа пар полюсов, несмотря на увеличение пускового тока каскада, момент каскада уменьшается. Наиболее рациональным соотношением числа пар полюсов по времени разгона и перераспределения напряжений на двигателях является  $\nu = 1,2 \div 1,5$ . С увеличением мощности разгонного двигателя степень перераспределения напряжений на двигателях снижается, а это ухудшает условия последней коммутации ПКС и протекания последующих за ней переходных процессов. Важным обстоятельством является тот факт, что при использовании в качестве разгонных одноступенчатых с рабочим двигателем машин (в частности, АН и АТД) величина момента каскада недопустимо мала. Но при применении специальных разгонных двигателей с повышенным



вытеснением и удельным сопротивлением клетки ротора, рассчитанных на пониженное номинальное напряжение, величина пускового момента каскада вполне достаточна для пуска привода турбомашин на закрытые задвижки. Электромагнитные переходные процессы в специальных разгонных двигателях протекают в более благоприятных условиях, чем в серийных, и затухают быстрее, но в целом условия их работы в ПКС остаются весьма тяжелыми, что и необходимо учитывать при их разработке и проектировании.

На основании анализа и сравнения результатов моделирования каскадного пуска одноступенчатых машин при условии постоянства их параметров и с учетом вытеснения тока в роторах установлено, что расхождения в мгновенных значениях отдельных величин, характеризующих эти процессы при одинаковых скольжениях, особенно в диапазоне от  $s=s_k$  до  $s=s_n$  достигают значительной величины. Так, при моделировании каскадного пуска двигателя АН-2000 при  $v=1,5$  эти расхождения в значениях максимального момента составили 38%, а двигателя АД-8000 при  $v=1,2$  — 44%. С увеличением соотношения числа пар полюсов расхождение в результатах моделирования при постоянных параметрах машин с учетом вытеснения тока в роторах уменьшается.

На основании сравнения результатов моделирования каскадного пуска ряда мощных двигателей с учетом изменения параметров обеих машин и только разгонных двигателей было установлено, что изменение параметров рабочего двигателя оказывает весьма незначительное влияние на время пуска и другие величины, характеризующие процесс до  $s=s_k$ . Поэтому в большинстве случаев исследование переходных процессов на АВМ до  $s_k$  с вполне допустимой погрешностью можно производить с учетом изменения параметров только разгонного двигателя.

Такое моделирование обеспечивает возможность решения ряда практических задач, связанных с разработкой и проектированием ПКС и разгонных двигателей для них.

#### **Расчет электромеханических переходных процессов в ПКС на ЭЦВМ**

Наиболее рациональным методом расчета электромеханических переходных процессов на ЭЦВМ является метод Рунге-Кутты, на основе которого в работе представлена программа расчета: предусматривается использование исходных преобразованных систем уравнений, описывающих эти процессы. Расчет на ЭЦВМ требует значительных затрат машинного времени. Так, время работы машины типа «Арагац», необходимое для решения одного варианта уравнений применительно к расчету одного каскада, составляет 4 час. 25 мин.

#### **Оценка методов аналитических расчетов и моделирования ПКС**

Оценка разработанных методов исследования и расчетов ПКС производилась путем сравнения результатов аналитических иссле-

дований и моделирования с результатами экспериментальных исследований. Для выполнения экспериментальных исследований ПКС в ППИ была создана специализированная лаборатория, обеспечивающая возможность исследования как систем с разгонными двигателями, так и систем только с электрической связью. Исследование последних производилось также непосредственно на промышленных установках, оснащенных такими системами. Программой работ предусматривалось исследование процессов в ПКС при различных условиях пуска рабочих двигателей без нагрузки, с постоянным и вентиляторным моментами сопротивления, с увеличенным моментом инерции. Частичные результаты этих исследований в виде усредненных зависимостей основных величин, характеризующих процессы каскадного пуска, полученных экспериментально и на моделях, представлены на рис. 2.

Значительные расхождения этих величин при скоростях выше  $0,4 \div 0,5 \omega_c$ , особенно при моделировании с постоянными параметрами машин, объясняются завышением при моделировании величины активных сопротивлений роторов, принятых при  $s=1$ . Весьма важным обстоятельством является то, что степень влияния изменения параметров рабочего двигателя на переходный процесс в системе от  $s=1$  до  $s=s_n$  в значительной степени определяется величиной его мощности. Если при пуске мощных, а тем более сверхмощных двигателей это влияние весьма незначительно, то у машин средней и, особенно, малой мощности оно весьма существенно. Данное обстоятельство, обусловленное различной кратностью пускового момента машины, зависящей от их мощности, необходимо учитывать при моделировании подобных систем с короткозамкнутым двигателем средней и малой мощности, которые могут найти практическое применение в качестве рабочих каскадов.

На основании сравнения результатов эксперимента и моделирования ПКС с учетом вытеснения тока в роторах обеих машин, при различных условиях пуска установлено, что данный метод моделирования обеспечивает весьма высокую точность результатов. Представленные в работе результаты моделирования и расчета на ЭЦВМ каскадного пуска двигателей подтверждают вывод о том, что во многих случаях экспериментальные исследования электромеханических переходных процессов в ПКС могут быть заменены их исследованиями на АВМ. В соответствии с этим точность аналитических методов расчета механических переходных процессов может быть установлена путем сравнения результатов этих расчетов с результатами моделирования на АВМ. На основании таких сравнений определена возможная область практического использования разработанных методов расчета.

Сравнение и анализ результатов всех проведенных исследований ПКС только с электрической связью показали, что моделирование на АВМ и расчеты на ЭЦВМ обеспечивают высокую точность их расчетов. Графоаналитические же методы расчета данных систем, точность которых зависит от многих субъективных факторов,



могут быть рекомендованы только для приближенной оценки этих систем.

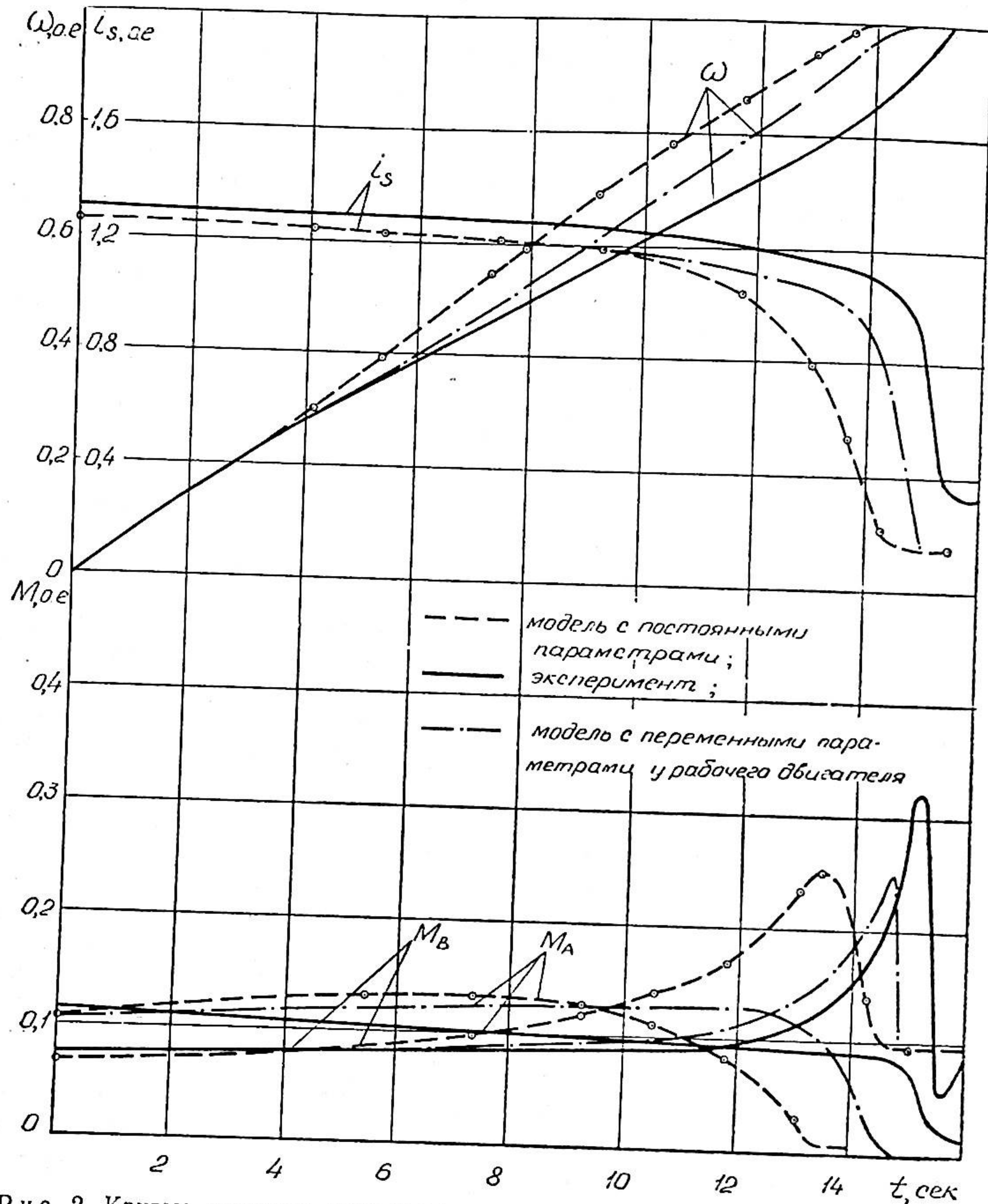


Рис. 2. Кривые скорости, тока и моментов при пуске АО 72—4 в каскадной системе с разгонным двигателем АО 51—4.

## Глава VI. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПКС И ИХ ОСНОВНЫЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

По условиям применения и исполнения ПКС классифицируются на две основные группы:

1. Системы, в которых проектирование и создание рабочего и

разгонного двигателей производится одновременно и с учетом их совместной работы в каскаде.

2. Системы каскадного пуска серийных короткозамкнутых двигателей, в которых функции разгонных выполняют также серийные двигатели с повышенным пусковым моментом, не рассчитанные для работы в пусковом каскаде.

Представленный в работе приближенный графоаналитический метод расчета систем второй группы базируется на использовании известных характеристик и каталожных данных машин. Этот метод определения условий пуска двигателя в каскаде и выбора мощности разгонного двигателя при соответствующих начальных и конечных условиях основан на использовании статических зависимостей эквивалентных сопротивлений двигателей в функции их скольжений. При этом условиями, характеризующими данный режим пуска, часть из которых должна быть задана, являются:

1. Коэффициент снижения пускового тока рабочего двигателя.
2. Минимальная величина начального пускового момента, обеспечивающая разгон привода в каскаде.
3. Величина момента рабочего двигателя к концу его разгона в каскаде.
4. Установившиеся значения напряжений на рабочем и разгонном двигателях к концу разгона при заданном моменте сопротивлений.

При заданной кратности снижения пускового тока рабочего двигателя

$$K_{CH} = \frac{I_{BП}}{I_{П}}$$

где  $I_{BП}$  — пусковой ток рабочего двигателя при номинальном напряжении;

$I_{П}$  — пусковой ток каскада, мощность разгонного двигателя приближенно определяется следующим выражением:

$$P_{AП} = \frac{K_{BП}}{K_{AП}} \cdot \frac{1}{P_{BП}(K_{CH}-1)}$$

$K_{BП}$ ,  $K_{AП}$  — кратности пусковых токов рабочего и разгонного двигателей.

После выбора разгонного двигателя необходимо одним из изложенных в работе методов произвести расчет переходного процесса и проверить его тепловое состояние к концу пуска.

Некоторое увеличение пускового момента каскада может быть обеспечено путем применения каскадного соединения рабочего и разгонного двигателей только на начальной и завершающей стадии пуска.

### Основные технико-экономические показатели ПКС

В зависимости от условий применения ПКС их экономическая эффективность проявляется или через эффективность рабочего дви-



гателя и затраты на коммутирующую аппаратуру и разгонный двигатель или только через последние затраты.

Если применение ПКС для мощных и сверхмощных двигателей предусматривается еще на стадии их проектирования и разработки, то тем самым обеспечивается возможность разделения функций между рабочим и разгонным двигателями. При этом создаются условия для улучшения рабочих и, в частности, энергетических характеристик главного двигателя. Экономическая эффективность ПКС в этом случае будет определяться повышенной эффективностью рабочего двигателя с улучшенными его характеристиками и сравнением затрат на данную и другие системы, обеспечивающие равные с ПКС условия пуска. Очевидно, в данном случае экономическая эффективность ПКС может быть определена только при проектировании и разработке самих рабочих двигателей с учетом и без учета применения этих систем.

Другими характерными условиями применения ПКС является их использование для пуска двигателей, спроектированных без учета применения таких систем. В этих случаях применение ПКС не оказывает влияния на рабочие характеристики главного двигателя. Поэтому их экономическая эффективность определялась только путем сравнения затрат на ПКС и другие системы, обеспечивающие одинаковые основные условия пуска рабочего двигателя.

Принималось, что:

- 1) при заданных коэффициенте заполнения графика нагрузки, числе пусков в сутки их длительности значение пусковых токов не превышает допустимых для данного трансформатора значений;
- 2) обеспечен избыточный момент привода;
- 3) двигатель не перегревается выше допустимых пределов;
- 4) изменения напряжения в сети вследствие действия пусковых токов не затрудняет работу других потребителей этой системы.

На основании анализа результатов расчета процесса пуска двигателей мощностью свыше 4000 квт установлено, что при соотношении мощности трансформатора и пускаемого двигателя  $\frac{S_{тн}}{S_{дн}} = 3$  с напряжением короткого замыкания трансформатора  $e_k = 0,10 \div 0,11$  и заданном коэффициенте снижения напряжения  $K_u = 0,95$  условная кратность пускового тока двигателя не должна превышать  $i'_n = 1,5$ . При данной кратности пускового тока лишь системы ПКС и блок трансформатор — двигатель в состоянии обеспечить пуск таких двигателей. В соответствии с изложенным экономическая оценка системы каскадного пуска применительно к мощным (свыше 4000 квт) и сверхмощным двигателям производилась сравнением затрат на ПКС и систему Т—Д, с учетом затрат на:

- 1) основное оборудование;
- 2) активные материалы;
- 3) годовые активные потери.

При этом принималось, что:

- а) отношение  $\frac{S_{тн}}{S_{дн}} = 3$ ;
- б) число часов максимума нагрузки  $T = 7000$  час;

в) стоимость 1 квт-часа равна 1 коп.;

г) мощность разгонного двигателя ПКС составляет 20% мощности рабочего двигателя.

Сравнение годовых приведенных затрат позволило сделать следующие выводы.

1. Система блока трансформатор — двигатель и ПКС, используемые для пуска серийных машин, по годовым приведенным затратам почти равноценны.

2. Применение ПКС при вновь создаваемых машинах и повышение в связи с этим к. п. д. рабочего двигателя на 1% обеспечивает снижение приведенных годовых затрат на 7% по сравнению с такими затратами на систему блока Т—Д.

3. ПКС обеспечивает меньшую стоимость годовых потерь энергии, чем система блока Т—Д.

К числу неучтенных факторов, влияющих на экономическую эффективность системы привода, относятся его надежность и долговечность при различных системах пуска. Учитывая, что ПКС обеспечивает пуск машин при пусковом токе, близком к номинальному его значению, данные показатели при условии применения ПКС будут выше, чем система блока Т—Д. С ростом мощности пускаемых двигателей эти преимущества ПКС по сравнению с системой блока Т—Д будут увеличиваться. Учитывая, что мощность крупных короткозамкнутых двигателей, применяемых в отечественной практике в настоящее время, составляет в основном 1000 ÷ 4000 квт, в большинстве случаев необходимые условия облегченного пуска таких машин в состоянии обеспечить не только каскадные, но и другие, более простые системы. Поэтому определенный практический интерес представляет сравнение затрат на ПКС и эти системы. Установлено, что применительно к двигателям мощностью до 4000 квт (за исключением каскада только с электрической связью) наиболее экономичной и рациональной системой при  $K_u = 0,95$  и ниже является реакторная система пуска.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нормальные условия эксплуатации мощных и, особенно, сверхмощных асинхронных короткозамкнутых двигателей могут быть обеспечены при решении проблемы их пуска. Самые благоприятные условия пуска таких двигателей обеспечивают пусковые каскадные системы с разгонными двигателями. Пуск двигателя в ПКС осуществляется при токах, близких к его номинальному значению, при отсутствии ударных моментов и динамического перегрева обмоток ротора.

Пусковая каскадная система обеспечивает полное разделение функций между разгонным и рабочим двигателем, благодаря чему создаются условия для улучшения характеристик рабочего двигателя, если последний разрабатывается с учетом этого фактора. Специфичность условий протекания процессов в ПКС исключает возможность непосредственного использования известных методов для их исследования и расчета.



Установлено, что ПКС следует рассматривать как единую электромеханическую систему, в которой двигатели являются последовательно соединенными ее элементами. Такое рассмотрение ПКС обеспечило возможность разработки методов и проведение всесторонних исследований как переходных, так и установившихся процессов в них, с учетом всех основных физических явлений и дополнительных факторов, сопутствующих различным режимам пуска двигателя в каскаде и зависящих от типа применяемых в них машин.

Основные результаты этих исследований кратко сводятся к следующему.

1. Полученная объединенная система дифференциальных уравнений, математически описывающая электромеханические переходные процессы в ПКС при условии постоянства параметров машин, применительно к произвольной скорости координатных осей, является математической основой для исследования этих процессов не только в пусковых каскадах, но и в любых других системах с последовательно соединенными асинхронными двигателями.

2. Анализ и расчет электромеханических переходных и установившихся процессов в ПКС с учетом изменения параметров глубокопазных двигателей рационально производить представленным методом, разработанным на основе замены клетки глубокопазного ротора многозвенной цепной схемой, то есть эквивалентной многоклеточной и, в частности, двухклеточной обмоткой с постоянными параметрами клеток.

3. Установлено, что с вполне допустимой для практических расчетов погрешностью эквивалентные параметры двойной клетки могут определяться при базисных скольжениях  $s_0 = 1$ .

4. Зависимости, определяющие геометрические места э. д. с., токов и напряжений, действующих в каскадах, полученные на основе решений уравнений переходных электромагнитных процессов, позволяют анализировать процессы в ПКС при установившихся режимах.

5. Для решения преобразованных уравнений, описывающих переходные электромеханические процессы в ПКС на АВМ и ЭЦВМ, в работе представлены программы и структурные схемы моделей, воспроизводящих эти процессы применительно к различным типам машин и различным условиям пуска двигателей в каскаде.

6. Установлено, что моделирование ПКС на АВМ наиболее рационально производить в синхронно вращающихся осях. При этом обеспечивается более высокая точность результатов моделирования.

7. Разработанная структурная схема модели ПКС, с учетом изменения параметров ротора только разгонного двигателя, обеспечивает возможность решения ряда практических задач, связанных с расчетом и проектированием специальных разгонных двигателей и, в частности, определения рациональной формы паза их ротора.

8. Анализ результатов моделирования однопольных каскадных

систем при постоянных параметрах машин с учетом вытеснения тока в роторах и сравнение с результатами экспериментальных исследований позволили установить следующее:

а) расхождения в мгновенных значениях отдельных величин, характеризующих переходные процессы при постоянных параметрах и с учетом их изменения, достигают значительной величины, например, максимального момента — более 40%, времени разгона — 30%;

б) с увеличением отношения числа пар полюсов расхождения в результатах моделирования с учетом и без учета изменения параметров машин уменьшаются;

в) изменение параметров рабочего двигателя оказывает весьма незначительное влияние на время его пуска в каскаде и другие величины, характеризующие переходный процесс в ПКС в диапазоне скольжений от  $s=1$  до  $s \geq s_k$ ;

г) достоверные результаты исследования процесса околосинхронной скорости рабочего двигателя могут быть получены только при моделировании с учетом изменения параметров обеих машин;

д) все разработанные модели устойчивы в работе и рекомендуются для практического использования при разработке и проектировании каскадных систем.

9. Полученные аналитические выражения для определения времени разгона двигателей в каскаде и зависимости их скорости от времени, применительно к различным условиям пуска, могут быть использованы при практических расчетах ПКС с разгонными двигателями.

10. Приближенный расчет и оценку характеристик ПКС только с электрической связью следует производить изложенными в работе графоаналитическими методами, обеспечивающими возможность определения всех величин, включая зависимости между скольжениями двигателей.

11. При разработке асинхронных электроприводов на базе серийных машин с использованием ПКС определение начальных и конечных условий пуска двигателей в каскаде и выбор мощности разгонного двигателя следует производить изложенным в работе графоаналитическим методом по каталожным данным машин.

12. Точность всех разработанных аналитических и графоаналитических методов расчета и моделирования ПКС на АВМ подтверждена результатами экспериментальных исследований в лабораторных и частично промышленных условиях.

13. На основании анализа результатов исследования электромеханических переходных процессов при каскадном пуске двигателей мощностью от 20 до 8000 кВт, при различных моментах сопротивления и инерции, различных отношениях чисел пар полюсов рабочего и разгонного двигателей установлено:

а) при пуске двигателей в каскаде  $M_c = 0$  и незначительном моменте инерции возможен разгон рабочего двигателя свыше синхронной скорости, при этом возникают значительные колебания электромагнитного момента и скорости в области  $S = 0$ ;



б) с увеличением отношения числа пар полюсов рабочего и разгонного двигателей суммарный пусковой момент каскада уменьшается, наиболее рациональное соотношение числа пар полюсов равно  $i = 1,2 \div 1,5$ ;

в) с увеличением мощности разгонного двигателя степень перераспределения напряжений на машинах снижается, что ухудшает условия последней коммутации и протекания последующих за ней переходных процессов, а также ограничивает величину допустимой нагрузки к моменту достижения рабочим двигателем предельной скорости в каскаде;

г) при использовании в качестве разгонных серийных, а в том числе и с фазным ротором машин увеличение пускового момента может быть обеспечено путем применения каскадного соединения только на начальной и завершающей стадиях разгона привода;

д) специальные разгонные двигателя должны рассчитываться применительно к условиям их работы в каскаде на пониженные, относительно стандартных, напряжения и с учетом кратковременности режима работы.

14. Установлено, что при высоких требованиях стабильности напряжения наиболее рациональной и экономически эффективной системой облегченного пуска двигателей мощностью свыше 4000 кВт является каскадная система с разгонными двигателями, до 4000 кВт — реакторная система.

15. Представленные в работе методы исследования и расчета ГКС могут быть также использованы при исследовании и разработке других подобных систем с последовательно соединенными асинхронными двигателями.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ, ДОКЛАДЫВАЛИСЬ НА:

- а) Всесоюзной научно-технической конференции по электрификации и автоматизации горной промышленности, Днепропетровск, июнь 1965 г.;
- б) Всесоюзной конференции «Теория и практика применения автоматики, телемеханики, радиоэлектроники и энергетики в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности», Москва, март 1966 г.;
- в) Всесоюзной научно-технической конференции «Научные основы создания высокопроизводительных автоматизированных шахт с вычислительно-логическим управлением», Москва, декабрь 1966 г.;
- г) третьей Всесоюзной научно-технической конференции «Применение вычислительной техники в электротехнической промышленности», Таллин, ноябрь 1968 г., Москва, 1968 г.;
- д) «Пути рационализации и повышения экономичности электромеханического оборудования на горных предприятиях Севера», Ленинград, 1970 г.;
- е) ежегодных конференциях по итогам научно-исследовательских работ Пермского политехнического института, 1963—1971 гг.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Васильевский С. П., Кузнецов М. И. Каскадная система пуска привода двух однотипных насосов рудничного водоотлива. «Горные машины и автоматика», № 6, 1966, изд-во «Недра».
2. Васильевский С. П. Каскадные системы пуска привода горных машин и

механизмов с короткозамкнутыми асинхронными двигателями большой мощности. «Горная электромеханика и автоматика», вып. 6, 1966, Харьков.

3. Васильевский С. П., Кузнецов М. И. Каскадная система пуска асинхронных двигателей высокого напряжения привода рудничного водоотлива. «Горные машины и автоматика», № 9, 1966.

4. Васильевский С. П., Шулаков Н. В., Кузнецов М. И. Исследование систем привода насосов рудничного водоотлива методом математического моделирования. Сб. АН СССР, Сиб. отд. «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», № 3, 1967, изд-во «Наука».

5. Васильевский С. П., Кузнецов М. И. Устройство системы облегченного пуска привода трехнасосной установки рудничного водоотлива. «Горные машины и автоматика», № 1, 1966.

6. Васильевский С. П. Геометрические места токов электрически и механически связанного асинхронного короткозамкнутого каскада. Сб. научн. тр. ППИ XXV «Специальные системы электропривода», вып. 1, Пермь, 1967.

7. Васильевский С. П., Коваленко А. Н. Определение допустимой величины начального статического момента при каскадной системе пуска асинхронных короткозамкнутых двигателей. Сб. научн. тр. ППИ XXV «Специальные системы электропривода», вып. 1, 1967.

8. Васильевский С. П. Каскадные системы пуска приводов турбомашин с короткозамкнутыми асинхронными двигателями большой мощности. Сб. научно-техн. обзора «Автоматическое управление и энергетика установок нефтяной и газовой промышленности». Москва, 1967.

9. Васильевский С. П., Кузнецов М. И. Способ изменения пусковой характеристики центробежного насоса. «ПНТПО» ГОСИНТИ. Москва, 1965.

10. Васильевский С. П., Кузнецов М. И. Промышленные испытания каскадного пуска привода рудничного водоотлива с короткозамкнутыми двигателями. Сб. научн. тр. ППИ XXV «Специальные системы электропривода», вып. 1, Пермь, 1967.

11. Васильевский С. П., Шулаков Н. В., Кузнецов М. И. Математическое моделирование переходных процессов в приводе с асинхронными короткозамкнутыми двигателями. Изв. вузов «Энергетика», № 2, 1968.

12. Васильевский С. П., Шулаков Н. В., Кузнецов М. И. Моделирование каскадных систем пуска асинхронных короткозамкнутых двигателей по схеме замещения на АВМ. Изв. вузов «Электромеханика», № 8, 1967.

13. Васильевский С. П., Кузнецов М. И. Графоаналитические методы исследования переходных процессов в каскадных системах пуска асинхронных глубокопазных двигателей. Сб. «Специальные системы электропривода», вып. 2, Пермь, 1967.

14. Васильевский С. П. К вопросу об эксплуатации приводов горных машин и механизмов с короткозамкнутыми двигателями большой мощности. Сб. научн. тр. ППИ XXX, Пермь, 1967.

15. Васильевский С. П., Шулаков Н. В., Кузнецов М. И., Коваленко А. Н. Исследование переходных процессов в двигатель-реакторной каскадной системе пуска асинхронных короткозамкнутых двигателей на АВМ. Сб. «Специальные системы электропривода», вып. 2, Пермь, 1967.

16. Васильевский С. П., Земсдорф Г. К., Манн Э. Г., Шулаков Н. В. Исследование ударных токов и моментов при пуске крупных асинхронных короткозамкнутых двигателей на аналоговых вычислительных машинах. Сб. «Электротехническая промышленность», вып. 299, 1968.

17. Васильевский С. П., Девингаль Ю. С., Кузнецов М. И., Земсдорф Г. К., Лыскова С. К. Метод расчета на ЭЦВМ переходных процессов в каскадной системе пуска электропривода с короткозамкнутыми двигателями. Сб. «Специальные системы электропривода», вып. 2, Пермь, 1967.

18. Васильевский С. П., Манн Э. Г., Шулаков Н. В., Коваленко А. Н. Каскадная система пуска мощных короткозамкнутых двигателей с разгонными двигателями. Сб. «Электротехническая промышленность», № 304, 1968.

19. Васильевский С. П., Шулаков Н. В., Манн Э. Г. Моделирование жестко связанной каскадной системы асинхронного электропривода. Сб. «Специальные системы электропривода», вып. 2, Пермь, 1967.



20. Васильевский С. П.: Об использовании электродвигателей в качестве пусковых реакторов. Ж. «Колыма», № 6, 1968.
21. Васильевский С. П., Земсдорф Г. К., Манн Э. Г. Определение времени разгона короткозамкнутых двигателей при каскадном их пуске. Сб. «Специальные системы электропривода», вып. 3, Пермь, 1968.
22. Васильевский С. П., Коваленко А. Н. Нестационарный нагрев обмоток ротора короткозамкнутых двигателей в каскадных пусковых системах. Сб. матер. по итогам НИР, 1968, ППИ, Пермь.
23. Васильевский С. П., Коваленко А. Н., Манн Э. Г., Шулаков Н. В. К вопросу определения мощности разгонного двигателя в пусковой каскадной системе. Сб. «Специальные системы электропривода», вып. 3, 1968, Пермь.
24. Васильевский С. П., Шулаков Н. В. Исследование установившихся и переходных процессов в глубокопазных двигателях на ЭВМ методом эквивалентной их замены двухклеточными. Сб. научн. тр. № 62 «Специальные системы электропривода», ППИ, Пермь, 1969.
25. Васильевский С. П., Шулаков Н. В. Исследование каскадных систем пуска короткозамкнутых двигателей. Ж. «Электротехника», № 5, 1970.
26. Васильевский С. П., Коваленко А. Н. Расчет нагрева глубокопазного ротора разгонного двигателя в пусковых каскадных системах. Сб. научн. тр. ППИ № 62 «Специальные системы электропривода», Пермь, 1969.
27. Васильевский С. П. и др. Каскадные системы пуска асинхронных короткозамкнутых двигателей. «Электричество», № 8, 1970.
28. Шулаков Н. В., Васильевский С. П., Манн Э. Г. Математическое моделирование каскадных систем пуска короткозамкнутых двигателей по полным дифференциальным уравнениям. Изв. вузов «Электромеханика», № 8, 1970.
29. Васильевский С. П., Шулаков Н. В. К вопросу определения влияния вытеснения тока в короткозамкнутых двигателях на динамику каскадного пуска. Сб. научн. тр. ППИ № 78 «Специальные системы электропривода», Пермь, 1970.
30. Васильевский С. П., Любимов Э. В., Динкель А. Д., Адиятуллин Р. К. Система физического моделирования постоянного момента сопротивления. Сб. научн. тр. XXV, ППИ, 1967.
31. Васильевский С. П. Об использовании серийных короткозамкнутых двигателей в качестве разгонных для пусковых каскадных систем. Сб. научн. тр. ППИ «Горная электромеханика», № 63, Пермь, 1970.
32. Васильевский С. П., Шулаков Н. В. Исследование систем облегченного пуска асинхронного привода рудничных турбомашин на АВМ. Сб. научн. тр. ППИ «Горная электромеханика», № 63, Пермь, 1970.
33. Васильевский С. П., Шулаков Н. В. Исследование пусковых каскадных систем асинхронных короткозамкнутых двигателей на АВМ. Изв. вузов «Энергетика», № 1, 1971.
34. Васильевский С. П., Шулаков Н. В. Моделирование на АВМ электромашиных систем с глубокопазными двигателями на основе мгновенной схемы замещения их роторов. «Электричество», № 9, 1971.
35. Васильевский С. П., Динкель А. Д., Любимов Э. В., Адиятуллин Р. К. Система физического моделирования машин и механизмов с моментом в функции скорости. Сб. научн. тр. «Специальные системы электропривода», ППИ, вып. 2, Пермь, 1967.
36. Васильевский С. П., Земсдорф Г. К., Шулаков Н. В., Манн Э. Г. Аналитический метод исследования переходных процессов в короткозамкнутых двигателях при каскадной системе их пуска. Сб. научн. тр. ППИ № 95 «Исследование кабелей, материалов и электроприводов», Пермь, 1970.
37. Васильевский С. П., Кузнецов М. И., Юрин А. С., Сапунков М. Л., Борисова А. И. Система облегченного пуска привода рудничного водоотлива с короткозамкнутыми асинхронными двигателями низкого напряжения. Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР. Регистрационный № 5465704 от 16. I. 1968 г.
38. Васильевский С. П., Кузнецов М. И., Юрин А. С., Сапунков М. Л., Борисова А. И. Исследование каскадной системы пуска асинхронных короткозамкнутых двухклеточных двигателей большой мощности. Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР. Регистрационный № 32—57773 от 21. IX. 1966 г.

39. Васильевский С. П., Манн Э. Г. Определение геометрических мест тока и напряжений короткозамкнутых двигателей при каскадном их пуске с разгонными двигателями. Сб. научных трудов ППИ «Специальные системы электропривода», вып. 3, Пермь, 1968.
40. Васильевский С. П., Шулаков Н. В. Сравнение и оценка различных методов математического моделирования каскадных систем пуска короткозамкнутых двигателей. Сб. «Специальные системы электроприводов», вып. 3, Пермь, 1968.
41. Васильевский С. П., Шулаков Н. В. Математическое моделирование на АВМ специальных режимов короткозамкнутых двигателей с переменными параметрами. Применение вычислительной техники в электротехнической промышленности. Доклады на третьей научно-технической конференции. Таллин, 1968, Всесоюзный научно-исследовательский институт электромеханики, Москва, 1971.



---

Подписано в печать 1/ХІ 1971 г. Формат бумаги 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Объем 2<sup>1</sup>/<sub>8</sub> п. л.  
ЛБ02384. Тираж 290 экз. Зак. 9204.

---

Тип. изд. «Звезда», г. Пермь, ул. Дружбы, 34.