

БЭД

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Технологические основы управления системами машинного водоподъема	5
Глава II. Взаимосвязь объектов системы машинного водоподъема	16
Глава III. Математические модели и структурные схемы объектов систем машинного водоподъема	55
Глава IV. Математическое моделирование объектов систем машинного водоподъема	82
Глава V. Оптимальное управление объектами систем машинного водоподъема	110
Заключение	133
Список использованной литературы	134

P-35

Ш.Х. РАХИМОВ

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ МАШИННОГО ВОДО- ПОДЪЕМА



ТС-266

626.82

АКАДЕМИЯ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР
УЗБЕКСКОЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ОБЪЕДИНЕНИЕ «КИБЕРНЕТИКА»
СРЕДНЕАЗИАТСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ИРРИГАЦИИ ИМЕНИ В. Д. ЖУРИНА (САНИИРИ)

Ш. Х. РАХИМОВ

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ МАШИННОГО ВОДОПОДЪЕМА

Дорогому Виктору Абрамовичу,
на добрую память с благодарностью
за добросовестное отношение к
автору и за печенье, которое
улучшило содержание книги.

Ш.Х. Рахимов.

26.06.17.

г. Ташкент.

ТАШКЕНТ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ФАН» УЗБЕКСКОЙ ССР

1986

УДК 681.5:626.83

Ш. Х. Рахимов. Управление системами машинного водоподъема. Ташкент: Фан, 1986, с. 137.

В монографии исследуются объекты систем машинного водоподъема с целью выбора режимов их работы, обеспечивающих наименьшие потери воды и энергозатраты. Объекты рассматриваются как единая система: канал — насосная станция — электрическая сеть. На основе математического моделирования даются рекомендации по выбору систем автоматического регулирования (САР) бьефов подводящих каналов, устойчивости синхронного электродвигателя с САР и т. д.

Для специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией каналов, насосных станций и питающих электрических сетей.

Лит. 76 назв., табл. 5, рис. 52.

Ответственный редактор
докт. техн. наук У. Умаров

Рецензенты:
канд. техн. наук Р. А. Усманов,
канд. техн. наук А. Ш. Алиев

Шавкат Хударгенович Рахимов

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ МАШИННОГО ВОДОПОДЪЕМА

Утверждено к печати Ученым советом
ИК с ВЦ УзНПО «Кибернетика»
и бюро ОМПУ АН УзССР

Редактор Л. М. Мазурина
Художник Г. Н. Просвилов
Технический редактор Г. П. Науменко
Корректор И. А. Подтуркина

ИБ № 3355

Сдано в набор 25.04.86. Подписано к печати 27.05.86. P03557. Формат 60×90^{1/16}.
Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ.
л. 8,5. Уч.-изд. л. 8,3. Тираж 1000. Заказ 91. Цена 1 р. 30 к.

Издательство «Фан» УзССР: 700047. Ташкент, ул. Гоголя, 70.
Типография Издательства «Фан»: Ташкент, проспект М. Горького, 79.

Р 3802030100—2840 160—86 © Издательство «Фан» Узбекской ССР, 1986
М 355(04)—86

ПРЕДИСЛОВИЕ

В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года» в стране предусмотрено «...вести за пятилетие в эксплуатацию за счет государственных капитальных вложений 3,3 млн. гектаров орошаемых и 3,6 млн. гектаров осушенных земель..., улучшить техническое состояние действующих оросительных систем на площади 5,6 млн. гектаров. Разработать и осуществить меры по ускорению перехода на водосберегающие технологии орошения, бережливому использованию водных ресурсов. Углубить проработку проблем, связанных с региональным перераспределением водных ресурсов»¹.

В Узбекистане намечено «...обеспечить реконструкцию и улучшение использования действующих оросительных систем, ввести в эксплуатацию за пятилетие 360 тыс. гектаров орошаемых земель, обводнить 1,1 млн. гектаров пастбищ... Продолжить комплексное освоение Каршинской и Джизакской степей»².

Важнейшим фактором повышения эффективности водного хозяйства, роста производительности труда, рационального использования водных ресурсов является ускорение научно-технического прогресса.

В соответствии с решениями апрельского (1985 г.) Пленума ЦК КПСС, установками совещания в ЦК КПСС по вопросам ускорения научно-технического прогресса необходимо разработать и осуществить комплекс мероприятий по ускорению научно-технического прогресса в мелиорации, направленных на эффективное использование орошаемых и осушенных земель и водных ресурсов, повышение производительности труда на поливе и строительстве мелиоративных систем, экономии материальных сырьевых и топливно-энергетических ресурсов. Прежде всего необходимо создание автоматизированных систем управления водохозяйственными комплексами бассейнов важнейших рек юга европейской части страны и Средней Азии и специализированных служб для их эксплуатации.

Увеличение площадей орошаемых земель будет осуществляться при помощи самотечных оросительных систем и систем машинного водоподъема. Большая часть указанных площадей будет орошаться при помощи систем машинного водоподъема и это обуславливает необходимость проектирования и строительства большого количества подводящих и отводящих каналов, насосных станций и питающих электрических сетей.

Исследование режимов работы объектов систем машинного водоподъема, выбор и управление такими режимами работы, при которых обеспечиваются минимальные потери воды и энергозатраты, являются актуальными и имеют большое народнохозяйственное значение.

В настоящее время управление системами машинного водоподъема осуществляется диспетчерской службой через дежурный персонал, что не отвечает современным требованиям. Несовершенство управления приводит к перерасходу электроэнергии на водоподъем, непроизводительным сбросам и потерям воды, снижению надежности оборудования, невыполнению графика водо-

¹ Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года. М.: Политиздат, 1986, с. 47.

² Там же, с. 77.

подачи и т. д. Ущерб от этого, согласно экспертным оценкам, достигает нескольких десятков миллионов рублей в год.

В последние годы разрабатываются автоматизированные системы управления (АСУ) водохозяйственными комплексами (ВХК) бассейнов рек (АСУБ-Зарафшан, АСУБ-Сырдарья, АСУБ-Амударья, АСУБ-Днепр и др.), в состав которых входят системы машинного водоподъема.

Улучшение управления системами машинного водоподъема в составе разрабатываемых АСУ ВХК позволит повысить их технико-экономические показатели и надежность эксплуатации.

При создании АСУ ВХК наиболее трудоемкой является разработка ее математического обеспечения. Для этого необходимо иметь математические модели, учитывающие взаимосвязь объектов систем машинного водоподъема, результаты математического моделирования, на основе которых разрабатываются алгоритмы, и программы решения задач управления системой.

В монографии разрабатываются технологические основы управления системами машинного водоподъема и определяется взаимосвязь основных объектов — подводящих и отводящих каналов, насосных станций и питающих электрических сетей; разрабатываются математические модели, структурные схемы, алгоритмы и программы расчета; проводится математическое моделирование объектов систем машинного водоподъема; решается задача математической постановки и формализации оптимального управления системами машинного водоподъема. Все это обосновывает научную новизну проведенных исследований и полученных результатов.

Автор выражает благодарность Д. Д. Шульге, И. Бегимову, А. С. Касымбекову, Е. И. Легецкой и И. Ким за помощь в сборе материалов, редактировании и оформлении монографии.

Глава I. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ МАШИННОГО ВОДОПОДЪЕМА

Конструктивные составляющие объектов систем машинного водоподъема

Водозаборное сооружение (рис. 1) — это головной объект системы машинного водоподъема, через которое вода поступает из водисточника (реки или водохранилища). Его назначение — обеспечивать забор воды из водисточника в соответствии с графиком потребления и по возможности не допускать попадания в подводящий канал наносов, плавающего мусора, льда и шуги. Кроме того, оно должно давать возможность полностью или частично отключать подводящий канал во время ремонта, очистки или аварии.

Для подвода воды к зданию насосной станции в Узбекской ССР в основном применяются открытые подводящие каналы, которые имеют земляное русло или облицованы бетоном.

Подводящий канал оканчивается водоприемным сооружением (аванкамерой), обеспечивающим плавный подход воды ко

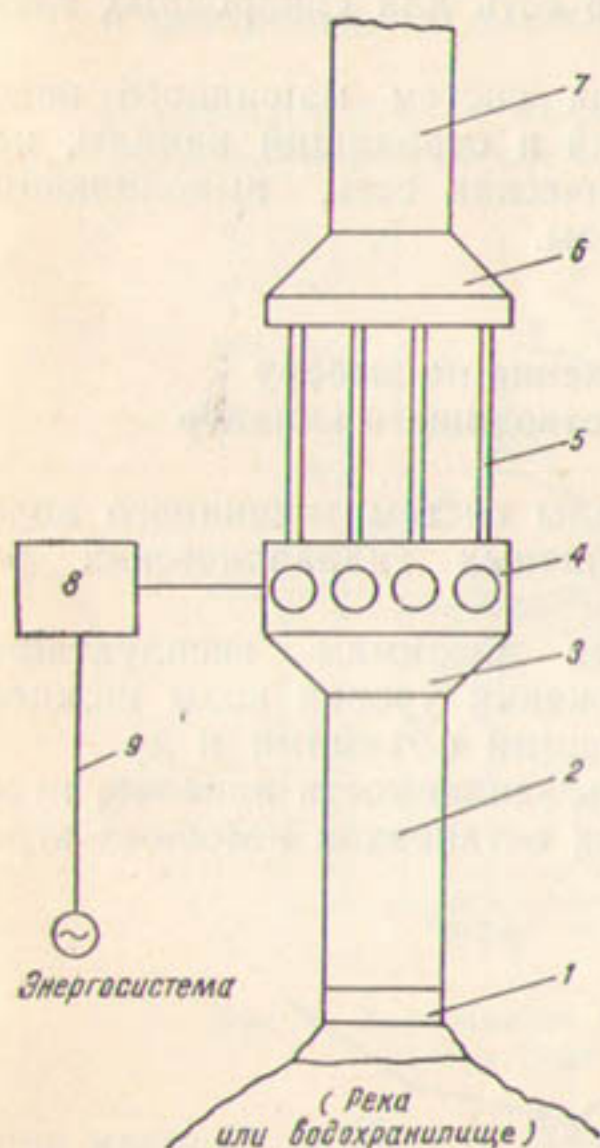


Рис. 1. Схема объектов систем машинного водоподъема для орошения.

1—водозаборное сооружение, 2—подводящий канал, 3—водоприемное сооружение (аванкамера), 4—здание насосной станции, 5—напорные трубопроводы, 6—водовыпускное сооружение, 7—отводящий канал, 8—понижительная подстанция, 9—высоковольтная линия электропередачи.

всем отверстиям водозаборных устройств здания насосной станции.

Для подъема воды в здании насосной станции установлено основное гидромеханическое, энергетическое и вспомогательное оборудование. К гидромеханическому оборудованию относятся затворы водозаборных устройств, направляющие аппараты и насосы, с помощью которых происходит забор воды из аванкаме-

ры и ее подъем на заданную высоту, к энергетическому — электродвигатели, служащие приводом основных насосов.

Вспомогательное оборудование насосной станции обеспечивает пуск, работу и остановку основного оборудования, а также нормальные условия эксплуатации насосной станции.

Напорные трубопроводы транспортируют воду под давлением (напором) из мест с пониженными отметками в места с более высокими.

Водовыпускное сооружение предназначено для соединения напорных трубопроводов с отводящим каналом, подающим воду к потребителям.

Понизительная подстанция снижает при помощи трансформатора высоковольтное напряжение линии электропередачи. Понизительная подстанция и высоковольтная линия электропередачи составляют питающую электрическую сеть для синхронных электродвигателей насосных агрегатов.

Из конструктивных составляющих систем машинного водоподъема наиболее важны подводящий и отводящий каналы, насосная станция и питающая электрическая сеть, выполняющие транспортировку, подъем и подачу воды.

Основные технологические положения по выбору режимов работы подводящего и отводящего каналов

Подводящий и отводящий каналы систем машинного водоподъема эксплуатируются при различных гидравлических режимах.

К наиболее часто встречающимся режимам эксплуатации относятся [1]: равномерный, поддержания уровня воды нижнего бьефа, верхнего бьефа, с перетекающими объемами и др.

Эти режимы должны не допускать заиляемость каналов, перелив воды через бровку при внезапных остановках насосных агре-

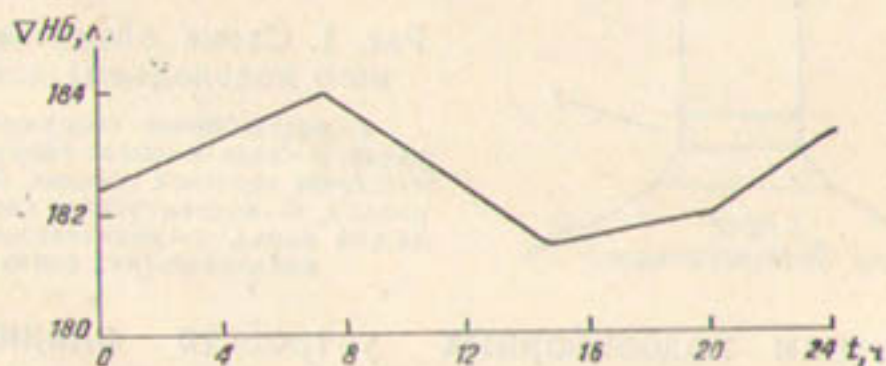


Рис. 2. Изменение уровня нижнего бьефа насосной станции Хамза-I в течение суток.

гатов, поддерживать уровень горизонтов воды в нижнем и верхнем бьефах насосной станции, обеспечивать бескавитационную работу и заданный режим работы насосного агрегата.

Уровень воды в подводящем канале зависит от изменения уровня воды в водоисточнике, количества расхода воды, поступающей в канал, геометрии и состояния канала. Уровень воды в отводящем канале колеблется в зависимости от количества работающих насосных агрегатов насосной станции, геометрии и состояния канала.

Результаты обследований и экспериментальных исследований на ряде насосных станций, расположенных на территории Узбекской ССР, показывают, что уровень воды в подводящих и отводящих каналах изменяется [2]. Приведен график изменения уровня нижнего бьефа насосной станции Хамза-1 в течение суток (рис. 2).

Выбор режимов работы осевых и центробежных насосов

В зависимости от высоты подъема воды на насосных станциях устанавливаются осевые или центробежные насосы. Обычно

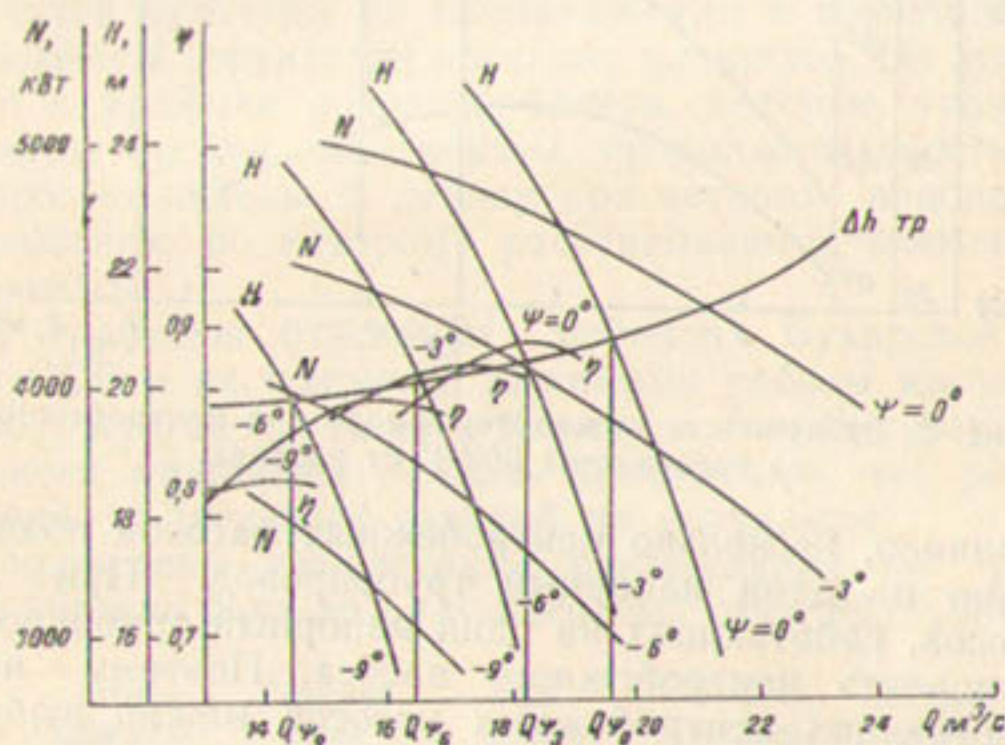


Рис. 3. Зависимость мощности, напора и кпд осевого насоса типа ОП 10—185 от расхода.

при напорах до 25 м устанавливают осевые насосы, более 25 м — центробежные.

Для определения режимов работы насосного агрегата при различных углах разворота лопастей осевого насоса и количестве центробежных насосов, работающих на один трубопровод, необходимо иметь их нагрузочные $N=f(Q)$ характеристики. Их можно построить, используя универсальную характеристику насоса [3], где приведены зависимости $H=f(Q)$ и $\eta=f(Q)$ по известной зависимости

$$N = \frac{9,81 QH}{\eta} \text{ (кВт)}, \quad (1.1)$$

где Q — расход насоса, $\text{м}^3/\text{с}$;
 H — напор, м;
 η — кпд насоса.

Для осевого насоса типа ОП10-185 насосной станции Шерабад эти зависимости приведены на рис. 3, а для центробежного насоса типа 56В-17 станции Хамза-1 на рис. 4.

Таким образом, изменением угла разворота лопастей ψ осевого насоса можно выбрать тот или иной режим работы насоса.

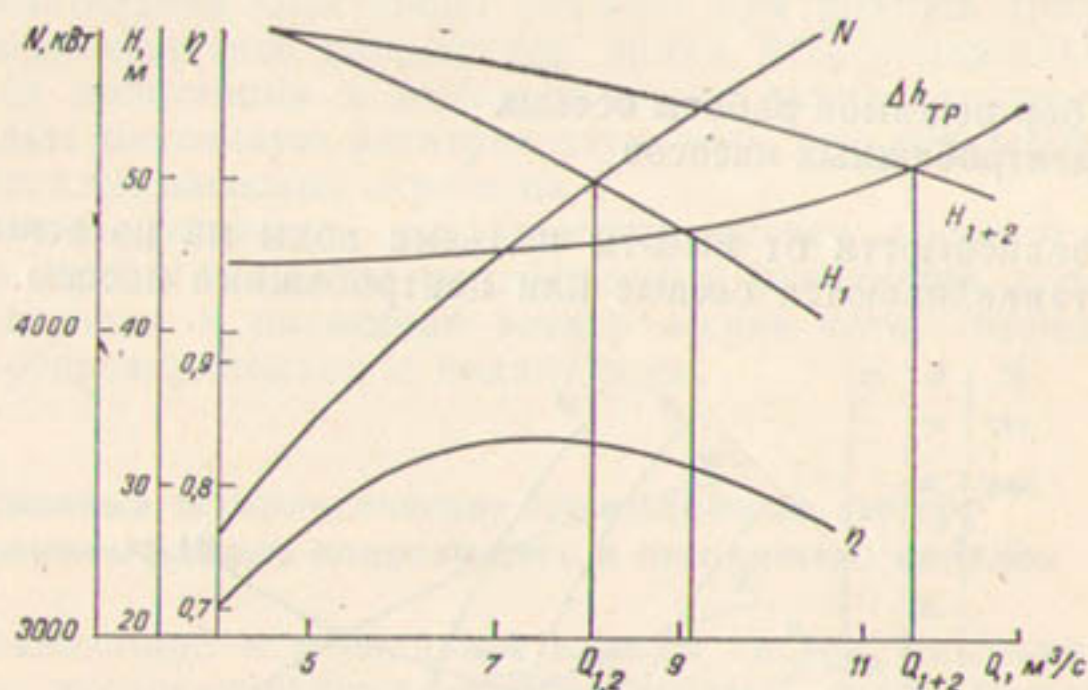


Рис. 4. Зависимость мощности, напора кпд центробежного насоса типа 56В-17 от расхода.

Как правило, несколько центробежных насосов подключаются параллельно на один напорный трубопровод. При изменении числа насосов, работающих на один напорный трубопровод, изменяется мощность центробежного насоса. Поэтому изменением числа работающих центробежных насосов можно выбрать тот или иной режим работы насосной станции.

Режим работы насосной станции и питающей электрической сети

Основным расчетным положением, предъявляемым при выборе оборудования насосной станции [4], является максимальная производительность, которая определяется по максимальной ординате укомплектованного графика водопотребления оросительной системы с учетом коэффициента форсировки.

Максимальный и минимальный напоры насосной станции определяются с учетом колебаний уровней воды в нижнем и верхнем бьефах в многолетнем разрезе.

Насосные станции по напору подразделяются на высоко-

($H=100$ м и выше), средне- ($H=20-100$ м) и низконапорные ($H=20$ м и ниже). По производительности подразделяются на крупные ($Q=10$ м³/с и больше), средние ($Q=10\div 1$ м³/с) и мелкие ($Q=1,0$ м³/с и меньше).

Приведены технические характеристики ряда средних и крупных насосных станций, расположенных на территории Советского Союза (табл. 1).

Насосные станции работают в режиме сезонного цикла — обеспечивают водопотребление орошаемого земледелия, или круглогодичного. С развитием машинного орошения в настоящее время построены и проектируются каскады насосных станций с аккумулялирующими водохранилищами для поддержания режима водопотребления орошаемого земледелия в весенне-летний и заполнения водохранилища в осенне-зимний периоды. Такие насосные станции работают круглогодично.

Проектирование оросительных систем обусловлено количеством, сроками и нормами поливов по наихудшим условиям засушливого года, установленными агротехническими требованиями для каждой культуры по климатическим и почвенным поясам, а также заданной структурой посевных площадей. По этим данным составляются графики водопотребления, которые укомплектовывают сдвигом сроков, изменением продолжительности поливов. Эти графики положены в основу расчетного водопотребления систем орошения, по которому рассчитываются элементы оросительной системы.

Анализ графиков отдельных районов Бухарской области Узбекской ССР и их покрытие режимами работы насосных станций Хамза-1, Куюмазар, Алат и Каракуль Аму-Бухарского и Аму-Каракульского машинных каналов показывают, что режимы водопотребления и насосных станций не совпадают.

Ниже приведены характерные расхождения по различным месяцам в течение года по ряду насосных станций Узбекской ССР (м³/с):

	Водо- потреб- ление	Покры- тие	Раз- ность	Водо- потреб- ление	Покры- тие	Раз- ность
		Январь			Май	
Хамза-1	16	19	+3	52	57	+5
		Март			Июнь	
Куюмазар	21	16	-5	56	60	+4
		Февраль			Июль	
Алат	12	10	-2	36	40	+4
		Июль			Август	
Каракуль	7,0	8,0	+1,0	7,5	6,0	-1,5
		Июль			Август	
Шерабад	89	93	+4	66	60	-6

(+) — избыток, (—) — нехватка воды на орошение.

Отсюда видно, что имеются такие месяцы, в течение которых наблюдается нехватка воды, а в других ее избыток. Несовпадение графиков водопотребления и эксплуатации режимов работы насосных станций влияет в первую очередь на урожайность сельскохозяйственных культур. Это также дополнительные потери

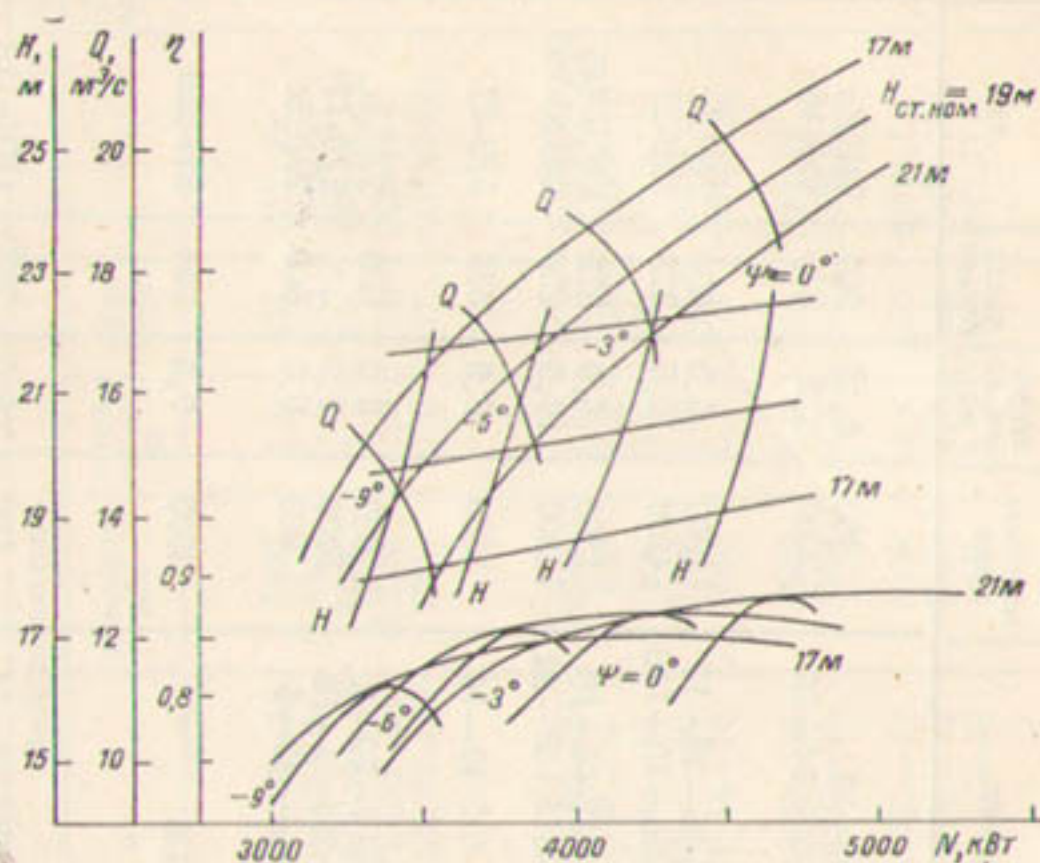


Рис. 5. Зависимость напора, расхода и кпд осевого насоса типа ОП 10—185 от мощности на валу при различных значениях угла разворота лопастей и статического напора насосной станции.

электроэнергии, что в итоге наносит ущерб народному хозяйству.

Как было отмечено выше, уровень воды в подводящем и отводящем каналах влияет на уровень нижнего и верхнего бьефов насосной станции, что влечет за собой изменение статического напора, следовательно, и производительности насосной станции.

Рассмотрим влияние статического напора насосной станции на различные режимы работы насоса на примере осевого насоса типа ОП10-185 насосной станции Шерабад. Для исследования использовали универсальную характеристику насоса и характеристику напорного трубопровода (Δh тр., рис. 3, табл. 2). На основе полученных результатов построены зависимости мощности и кпд насоса от статического напора насосной станции при различных углах разворота лопастей.

На рис. 5 приведены зависимости напора, расхода и кпд насоса от мощности на валу при различных значениях угла разворота лопастей и статического напора станции, которые дают возможность определить различные режимы насоса при изменении статического напора насосной станции. С увеличением стати-

ческого напора насосной станции, при любых значениях угла разворота лопастей, пропорционально увеличивается мощность на валу насосного агрегата и уменьшается производительность насоса, а кпд изменяется в зависимости от угла разворота лопастей.

Т а б л и ц а 2

Влияние изменения статического напора насосной станции
Шерабад на режим работы осевого насоса типа ОП 10—185

$H_{ст, м}$	$\phi=0^\circ$				$\phi=-3^\circ$			
	$Q, м^3/с$	$H, м$	η	$N, кВт$	$Q, м^3/с$	$H, м$	η	$N, кВт$
17,0	20,25	19,0	0,848	4460	18,8	18,6	0,85	4040
17,5	20,1	19,45	0,854	4490	18,65	19,0	0,854	4075
18,0	19,8	19,9	0,859	4500	18,5	19,5	0,858	4120
18,5	19,7	20,4	0,864	4620	18,25	20	0,862	4160
$H-19,0$	19,5	20,8	0,867	4640	18,0	20,55	0,865	4200
$ст_{ном}$								
19,5	19,3	21,3	0,871	4640	17,8	20,9	0,868	4210
20,0	19,0	21,7	0,876	4645	17,6	21,5	0,871	4260
20,5	18,8	22,2	0,88	4650	17,35	21,8	0,874	4250
21,0	18,6	22,6	0,884	4660	17,1	22,3	0,875	4280

$H_{ст, м}$	$\phi=-6^\circ$				$\phi=-9^\circ$			
	$Q, м^3/с$	$H, м$	η	$N, кВт$	$Q, м^3/с$	$H, м$	η	$N, кВт$
17,0	17,2	18,3	0,838	3680	15,2	18,0	0,808	3320
17,5	16,9	18,75	0,844	3690	14,85	18,6	0,81	3350
18,0	16,75	19,2	0,847	3720	14,7	19,0	0,81	2390
18,5	16,6	19,75	0,85	3780	14,5	19,5	0,81	3420
$H-19,0$	16,38	20,1	0,853	3780	14,35	20,8	0,81	3440
$ст_{ном}$								
19,5	16,15	20,7	0,856	3830	14,0	20,5	0,805	3500
20,0	15,8	21,2	0,856	3840	13,5	21,1	0,795	3520
20,5	15,65	21,6	0,855	3880	13,25	21,4	0,79	3530
21,0	15,4	22,1	0,85	3930	13,0	21,7	0,78	3550

В питающей электрической сети количество устанавливаемых понижающих трансформаторов определяется степенью надежности электроснабжения, количеством насосных агрегатов, ступенчатостью графика работы энергопотребителей насосной станции и принимается не более двух.

Большинство существующих насосных станций относится к электроприемникам второй категории, и для питания насосной станции в понизительной подстанции установлены два трансформатора.

Питание понизительных подстанций в основном осуществляется по одной высоковольтной линии электропередачи (тупиковой или ответвлением) с высшим напряжением до 220 кВ.

Для мощных и ответственных насосных станций (каскады насосных станций Каршинского магистрального канала и Джизакских насосных станций, вторая очередь насосных станций Аму-Бухарского машинного канала и др.), относящихся к электроприемникам первой категории, питание каждой понизительной подстанции предусматривается по двум линиям.

Большинство питающих электрических сетей имеет длинные линии электропередачи для питания насосных станций. По ним также осуществляется питание различных сельхозпотребителей, несущих активную, индуктивную и емкостную нагрузки, чем обуславливается потеря активной и реактивной мощности в питающей электрической сети.

Часто мощности питающей электрической сети и насосной станции оказываются соизмеримыми, поэтому насосная станция определяет тот или иной режим питающей электрической сети по передаваемой мощности.

В результате проведенных исследований выявлены следующие особенности объектов систем машинного водоподъема:

- 1) эксплуатация подводящих и отводящих каналов при различных гидравлических режимах;
- 2) возможность регулирования производительности осевых и центробежных насосов;
- 3) несоответствие покрытия графика водопотребления режимам насосной станции;
- 4) изменение уровней нижнего и верхнего бьефов станции;
- 5) соизмеримость мощностей питающей электрической сети и насосной станции;
- 6) различные режимы питающей электрической сети по передаваемой мощности.

На основе выявленных особенностей объектов машинного водоподъема можно определить технологическую взаимосвязь подводящих и отводящих каналов, насосной станции и питающей электрической сети и выбрать совместные режимы их работы.

Современное состояние управления системами машинного водоподъема

Современное состояние управления системами машинного водоподъема рассмотрим на примере управления Аму-Бухарским машинным каналом (АБМК) и каскадом насосных станций Каршинского магистрального канала (КМК).

Управление АБМК осуществляется центральной диспетчерской службой (ЦДС) через дежурных инженеров насосных станций и гидротехнических сооружений. Дежурные инженеры объектов управления подают заявки на подачу воды диспетчеру ЦДС. В течение суток пять раз диспетчер ЦДС собирает информацию о ходе технологического процесса. По этой информации с учетом заявок на подачу воды производится перерасчет и корректи-

ровка режимов водоподдачи канала. Дежурный персонал для определения различных режимов водоподдачи использует номограммы с зависимостями $Q=f(h)$; $Q=f(n)$; $N=f(Q)$, где Q , N , n — расход ($\text{м}^3/\text{с}$), мощность (кВт), число работающих насосных агрегатов; h — уровень нижнего бьефа (м) насосной станции.

Центральный диспетчерский пункт (ЦДП) каскада насосных станций КМК регулирует водозабор, транспортирование и водораспределение между потребителями. В зависимости от ситуации управления диспетчером ЦДП принимается общая стратегия управления каскадом, которая реализуется под его руководством дежурными инженерами насосных станций.

Во всех случаях общим при реализации стратегии является то, что диспетчер опрашивает дежурных инженеров о параметрах гидравлических режимов в бьефах перед насосными станциями, о состоянии основного технологического оборудования. Сбор технологической информации производится 12 раз в сутки.

В результате анализа обстановки на каскаде принимаются управляющие решения, которые по системе диспетчерской связи сообщаются дежурным инженерам насосных станций. По этим распоряжениям осуществляется пуск, остановка насосных агрегатов, изменяется производительность насосной станции разворотом лопастей и другие мероприятия.

Опыт эксплуатации объектов систем машинного водоподъема в настоящее время показывает, что они работают в режимах, выбранных для каждого объекта отдельно. Иногда режимы работы отдельных объектов выбираются интуитивно, без проведения соответствующих исследований. При этом учитываются особенности режимов работы и рабочие параметры только одного объекта системы машинного водоподъема.

Случайно выбранные режимы работы объектов могут оказаться не наилучшими с экономической точки зрения, поэтому необходимо рассмотреть объекты систем машинного водоподъема в технологической взаимосвязи. При этом появляется возможность использования теории систем многосвязного регулирования и принципов системного анализа к рассматриваемой задаче, которые дают полную картину взаимосвязей объектов системы машинного водоподъема и возможность принятия решения по управлению системой с минимальными энергозатратами на водоподъем.

Улучшение управления системами машинного водоподъема в составе разрабатываемых в последние годы АСУ ВХК бассейнов рек позволит повысить их технико-экономические показатели и надежность эксплуатации.

Для разработки математического обеспечения АСУ необходимы математические модели объектов систем машинного водоподъема, учитывающие их технологическую взаимосвязь, на основе которых разрабатываются алгоритмы и программы решения задач управления системой.

Глава II. ВЗАИМОСВЯЗЬ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМЫ МАШИННОГО ВОДОПОДЪЕМА

Взаимовлияние режимов работы подводящих и отводящих каналов и насосной станции

При совместной работе объектов систем машинного водоподъема насосные станции предъявляют к подводящим и отводящим каналам ряд требований.

1. Поддержание достаточно высокого уровня нижнего бьефа насосной станции для обеспечения условий пуска насосного агрегата.

2. Понижение уровня нижнего бьефа насосной станции недопустимо по кавитационным условиям насосного агрегата.

3. Уровень верхнего бьефа насосной станции должен быть достаточным для нормальной и безаварийной эксплуатации сифона напорного трубопровода.

С другой стороны, максимальная величина наполнения подводящего канала ограничивается условиями безаварийности, незаляемости, испарения и фильтрации воды, а минимальная величина наполнения отводящего канала — условиями нормальной и безаварийной эксплуатации сифона напорного трубопровода, потерь энергии на трение. Поэтому необходимо выбрать такие режимы работы подводящих и отводящих канлов, которые как можно полнее удовлетворяли бы требованиям насосной станции, но с учетом собственных ограничений. Только в этом случае можно снизить суммарную геометрическую высоту подъема воды насосной станции.

Влияние снижения напряжения питающей электрической сети на пусковые режимы и реактивную мощность синхронного электродвигателя насосного агрегата

При анализе схем электроснабжения насосных станций выявлено, что структура схем типовая (рис. 6).

Опыт эксплуатации насосных станций показывает, что напряжение на шинах колеблется в широком диапазоне и зависит от мощности энергосистемы, длины высоковольтной линии электропередачи, режимов работы других потребителей, параллельно работающих с насосной станцией, а также от степени загрузки и режимов синхронных электродвигателей.

Понижение напряжения на шинах насосной станции особенно часто наблюдается во время пуска отдельных насосных агрега-

тов. При постоянстве нагрузки на валу насосного агрегата от степени понижения напряжения сети зависит время пуска синхронного электродвигателя. Отставание во времени асинхронного пуска может привести к перегреву и выходу из строя пусковой обмотки синхронного электродвигателя. Критерий допустимости пуска насосного агрегата — степень нагрева пусковой обмотки, которая зависит от величины пускового тока и продолжительности пуска синхронного электродвигателя. Поскольку величина пускового тока не превосходит определенной величины (указанной заводом), задача определения нагрева пусковой обмотки

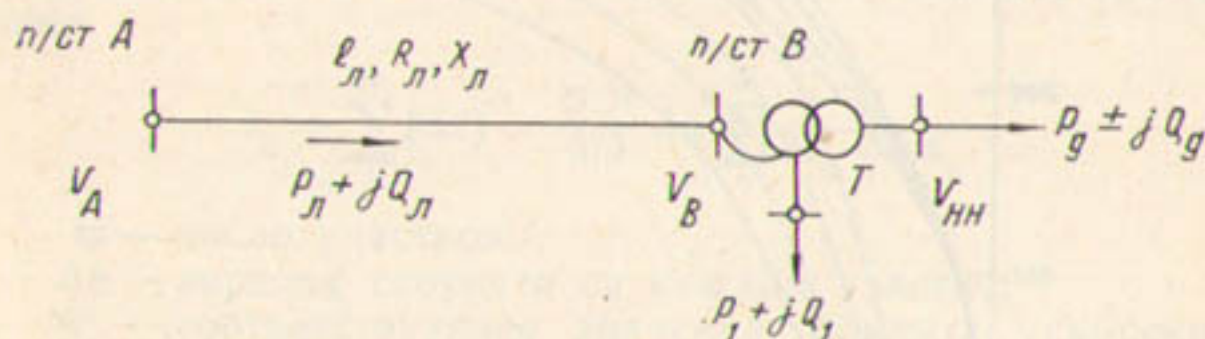


Рис. 6. Схема электроснабжения насосной станции.

сводится к определению характера и продолжительности пуска синхронного электродвигателя.

Исходными данными для определения продолжительности пуска являются механические (пусковые) характеристики насоса и синхронного электродвигателя.

Анализ пусковых режимов работы насосных агрегатов ряда насосных станций Узбекской ССР показывает, что пуск синхронного электродвигателя из-за пониженного напряжения питающей электрической сети происходит неблагоприятно [5].

Механическая характеристика насоса строится по универсальной и полученным мощностным характеристикам (рис. 3, 4).

По этим характеристикам, используя формулы динамического подобия

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}; \quad \frac{N_1}{N_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3}, \quad (2.1)$$

построены напорная и мощностная характеристики насоса в пусковом переходном режиме.

Предположим, что заполнение напорного трубопровода при пуске насосного агрегата происходит при переходе из одного установившегося режима к другому, подобному. Поэтому изменение режима работы насосного агрегата при увеличении скорости вращения от нуля до синхронной происходит по выбранной параболе

$$\frac{Q}{\sqrt[3]{N}} = \text{const} \text{ подобных режимов.}$$

Используя мощностную характеристику насоса в пусковом переходном режиме, построим характеристику $n=f(N)$, откуда пересчетом получим механическую характеристику осевого насоса типа ОП 10-185 $n=f(M)$ (рис. 7) при различных углах разворота

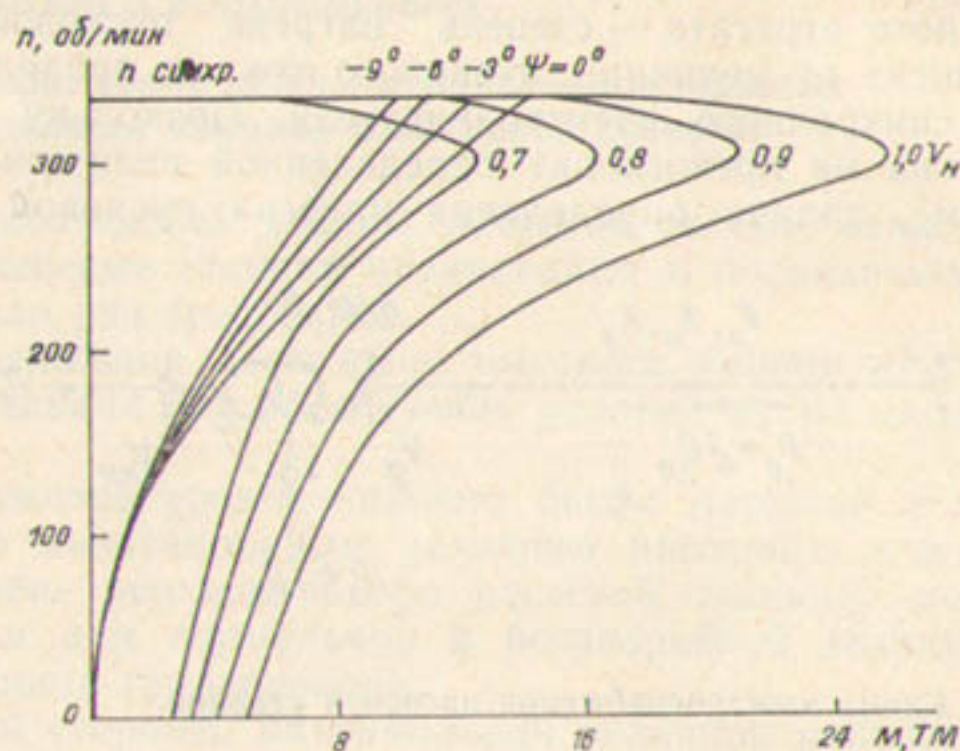


Рис. 7. Механические (пусковые) характеристики синхронного электродвигателя ВДСО-325/44—при снижении напряжения сети и осевого насоса ОП10-185 при различных разворотах лопастей

лопастей, а характеристика центробежного насоса типа 56В-17 совпадает с осевым при $\psi=0^\circ$.

Механическая характеристика синхронного электродвигателя по известным расчетным параметрам построена по методике, представленной в [7] (рис. 7).

Построив механические характеристики насоса и двигателя, можно найти продолжительность пуска насосного агрегата по хорошо разработанной методике [8], затем и температуру нагрева пусковой обмотки электродвигателя [9].

Для построения кривой скорости $n=f(t)$ и определения времени пуска двигателя используется метод площадей, сводящийся к графоаналитическому интегрированию уравнения движения.

При совмещении механических характеристик двигателя и насоса определим кривую момента ускорения

$$M_{\text{уск.}} = M_{\text{д.}} - M_{\text{с.}}, \quad (2.2)$$

где $M_{\text{уск.}}$ — момент ускорения;

$M_{\text{д.}}$ — момент, создаваемый двигателем;

$M_{\text{с.}}$ — момент сопротивления, создаваемый насосом.

Кривая момента ускорения делится на ряд участков, на каждом из которых момент предполагается постоянным и равным среднему значению.

Для каждого участка будет справедливо выражение

$$\Delta t = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{\Delta n}{M_{д.} - M_{с.}}, \quad (2.3)$$

где GD^2 — суммарный маховой момент ротора электродвигателя и насоса, т/м².

При равенстве величин Δn на всех участках общее время пуска равно

$$t_n = \sum_1^m (\Delta t) = \frac{GD^2}{375} \Delta n \sum_1^m \frac{1}{M_{д.} - M_{с.}}, \quad (2.4)$$

где m — число участков;

Δn — перепад скорости на каждом участке;

$M_{д.} - M_{с.}$ — соответствующее значение момента ускорения на каждом из участков.

Расчет времени пуска производился с учетом понижения напряжения во время пуска.

Величина понижения напряжения взята из результатов экспериментальных исследований [5]. На рис. 8 показано понижение напряжения во время пуска при различных углах ψ осевого насоса.

Время пуска синхронного электродвигателя насосного агрегата при различных углах разворота лопастей приведено ниже:

ψ°	t_n (расч.), с	t_n (экспер.), с
0	11,987	12,0
-3	11,965	12,3
-6	10,944	11,5
-9	10,44	11,2

Нагрев пусковой обмотки двигателя за время пуска можно подсчитать без учета теплоотдачи из-за непродолжительности времени пуска. Исключение составляют затяжные пуски, когда часть тепла, выделяемого в пусковой обмотке, отводится по стали ротора и охлаждающей средой. Расчет нагрева пусковой обмотки достаточно сложен, так как тепло выделяется в стержнях и замыкающих их кольцах, причем ток между стержнями распределяется неравномерно.

Для облегчения расчета в [9] предложена формула, где нагрев пусковой обмотки двигателя определяется пропорционально времени пуска

$$\tau_{нач.} = \frac{T_l P_n t_n}{G t_{нх}}, \quad (2.5)$$

где $\tau_{\text{нач.}}$ — температура нагрева пусковой обмотки, °C;
 T_j — механическая постоянная времени насосного агрегата, с;
 P_n — номинальная мощность двигателя, кВт;
 G — вес пусковой обмотки, кг;
 t_n — время пуска, с;
 $t_{\text{пх}}$ — время пуска при холостом ходе (без нагрузки), с.

При изменении напряжения на шинах насосной станции от $1,0 U_n$ до $0,5 U_n$ время пуска и нагрев пусковой обмотки колеблется в больших пределах.

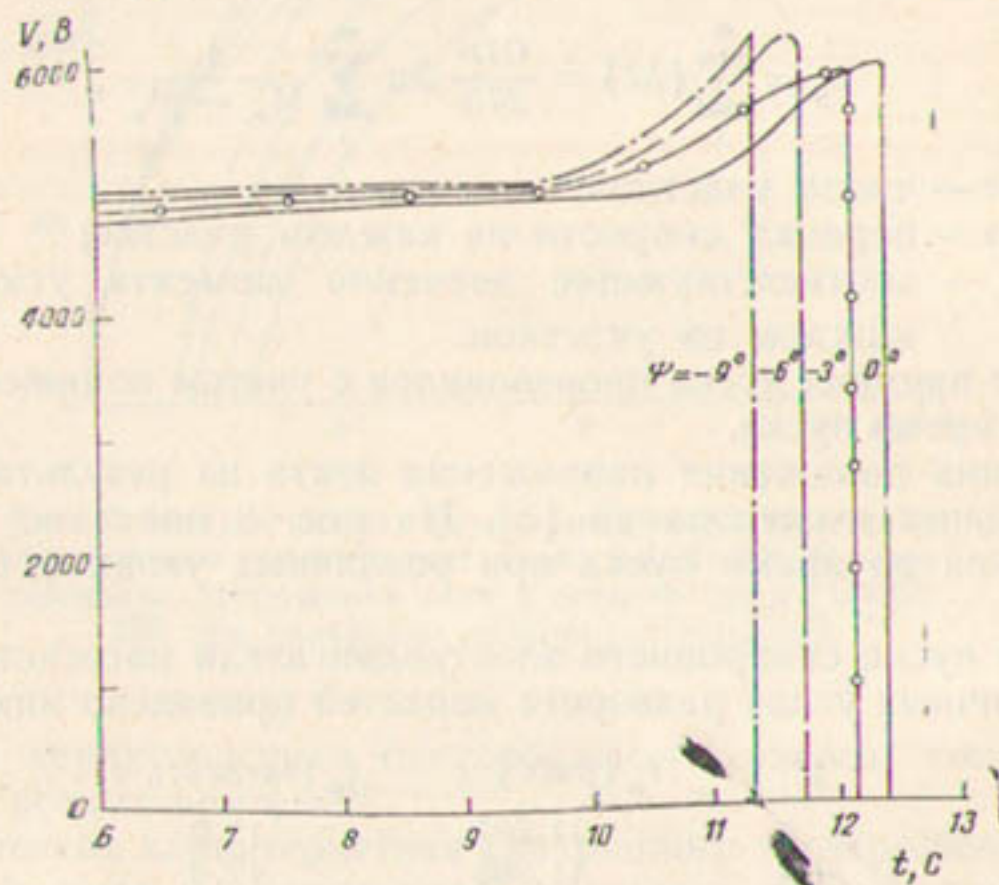


Рис. 8. Кривые снижения напряжения питающей сети при пусках насосного агрегата с различными значениями угла разворота лопастей.

Пусковая обмотка особенно перегревается при частых (повторных) пусках синхронного электродвигателя, что особенно часто наблюдается в процессе эксплуатации.

Для крупных синхронных электродвигателей промышленностью вводится ограничение по числу допустимых пусков, через каждые 5—7 пусков требуется ревизия электродвигателя, а общее число допустимых пусков в год не должно превышать 20—25, а иногда и меньше.

При пуске синхронного электродвигателя насосного агрегата при пониженном напряжении питающей электрической сети пусковая обмотка сильно нагревается. Повторные асинхронные пуски в процессе эксплуатации насосной станции при снижении напряжения питающей электрической сети на шинах до $0,7—0,8 U_n$

ведут к недопустимому перегреву пусковой обмотки (более 300°C) из-за соизмеримости момента сопротивления насоса с пусковым моментом электродвигателя. Это может способствовать выходу из строя пусковой обмотки синхронного электродвигателя, что довольно часто наблюдается на некоторых насосных станциях, расположенных на территории Узбекской ССР.

Ниже приводятся время пуска и нагрев пусковой обмотки при различных значениях угла разворота лопастей и напряжения на шинах насосной станции.

ψ°	$U_{\text{н}}$	$t_{\text{п}}, \text{с}$	$\tau_{\text{наг}}, ^{\circ}\text{C}$
0	1,0		101
	0,8	19,93	134
	0,6	22,03	228
-3	1,0	9,4	97,5
	0,8	12,3	127,5
	0,5	29,44	305
-6	1,0	9,07	94
	0,8	11,71	121
	0,5	24,05	250
-9	1,0	8,87	92
	0,8	11,25	116,5
	0,5	21,62	224

Расчет производился для одного пуска при различных заданных значениях угла разворота лопастей.

Обычно применяемый прямой асинхронный пуск синхронного электродвигателя выбирают из-за относительной дешевизны с учетом возможностей питающей электрической сети [10].

Принято считать, что насос не предъявляет никаких требований к пусковым схемам синхронного электродвигателя. В результате недоучета взаимосвязанности переходных процессов в блоках насосных агрегатов недоучитываются значительные динамические нагрузки на элементы конструкции блоков и ухудшаются их эксплуатационные показатели [11].

При пуске синхронного электродвигателя не только снижается напряжение питающей электрической сети и нагревается пусковая обмотка электродвигателя, но и изменяется ряд параметров блока насосного агрегата, что обусловлено взаимосвязанностью гидравлических и электрических переходных процессов.

В 1980—1981 гг. на насосной станции № 3 каскада Каршинского магистрального канала (осевой насос типа ОП10-260; синхронный электродвигатель типа ВДС-375—130/24; $P_{\text{н}}=12,5$ мВт; $U_{\text{н}}=10$ кВ; $n_{\text{н}}=250$ об/мин; пуск осуществлялся на опорожненный напорный трубопровод) проведены натурные экспериментальные исследования с целью выявления взаимосвязанности электрических и гидравлических переходных процессов¹. Получены зависимости, характеризующие изменения электрических и гидравлических

¹ Экспериментальные исследования проводились совместно с лабораторией эксплуатации насосных станций и водоподъемных машин САНИИРИ.

параметров блока насосного агрегата при пуске (рис. 9) [6].

Пуск насосного агрегата сопровождался значительным давлением в камере рабочего колеса (кривая P_1), что обусловлено динамической составляющей напора, зависящей от величины ускорения насосного агрегата. Величина давления в камере рабочего колеса достигает 3,2 м водяного столба (м. в. с.), что снижает величину кавитационного запаса насосного агрегата до 6,5 м. в. с.

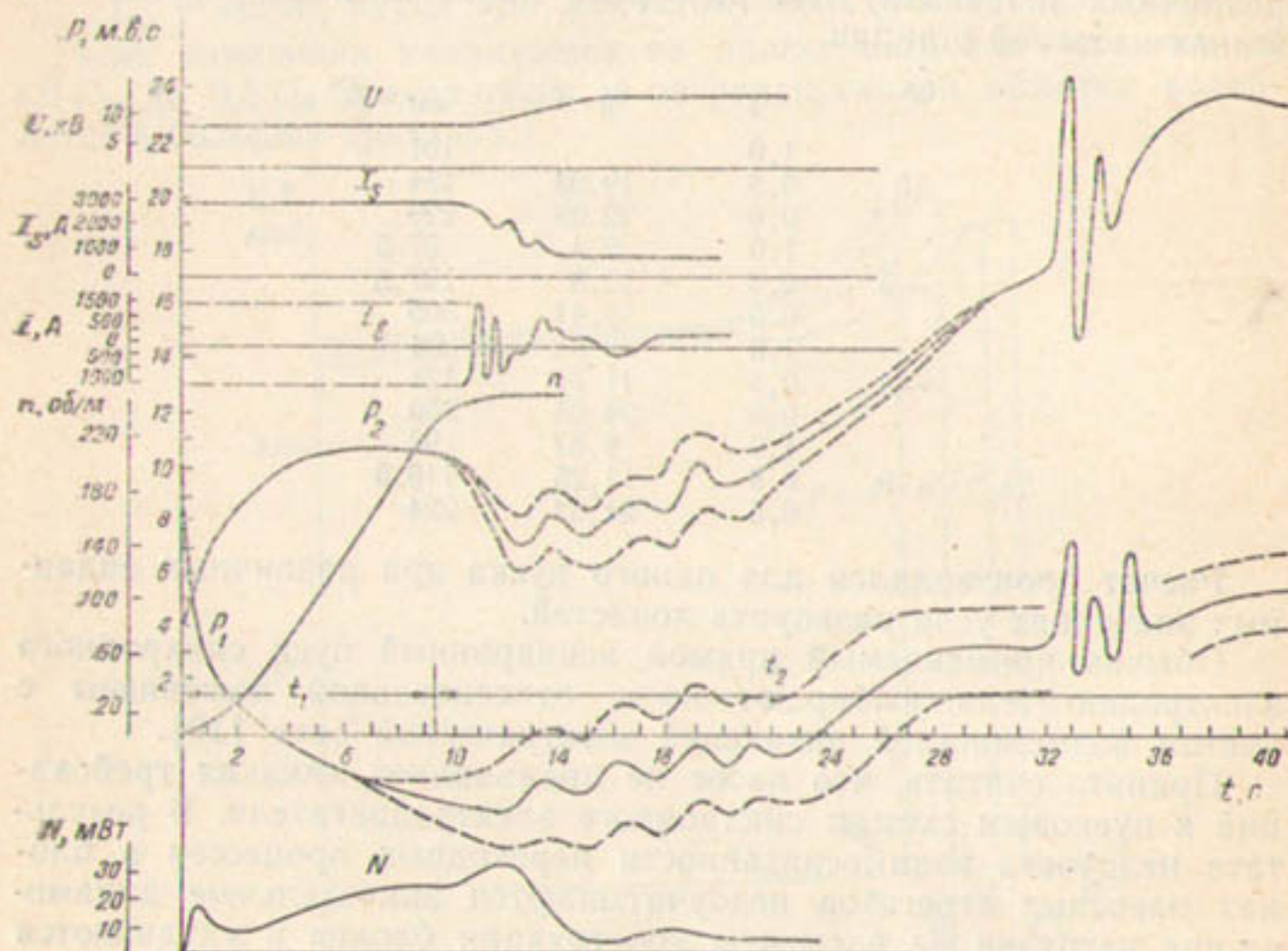


Рис. 9. Переходные электрические и гидравлические процессы при пуске насосного агрегата.

Давление в начале напорного трубопровода (кривая P_2) быстро нарастает, что также обусловлено величиной ускорения насосного агрегата.

Появление пульсаций давления в камере рабочего колеса насоса обусловлено действием гидродинамических переходных процессов, усиливаемых знакопеременным изменением ускорения из-за колебаний частоты вращения. Эти колебания возникают перед синхронизацией под действием реактивных моментов вращения от явно выраженных полюсов ротора синхронного электродвигателя.

Синхронизация синхронного электродвигателя после подачи тока возбуждения (кривая i_B) и выход на номинальную частоту вращения сопровождаются электромеханическими переходными

процессами втягивания ротора синхронного электродвигателя в синхронизм. Этот этап пуска отличается нарастающей пульсацией давления в проточной части насосного агрегата, которая достигает под рабочим колесом значения 4,7 м. в. с., а в начале напорного трубопровода 2,0 м. в. с. Такие колебания давления ухудшают протекание гидродинамических переходных процессов и формирование потока.

Напряжение на шинах насосной станции (кривая U) в начальный период пуска падает до $0,7 U_{\text{н}}$, а пусковой ток (кривая I_s) увеличивается в пять раз. Ток статора и потребляемая мощность синхронного электродвигателя после значительных колебаний, обусловленных втягиванием в синхронизм, к концу этапа пуска ($t_{\text{п}}=14$ с) спадают до значений, мало отличающихся от установившихся для рабочего режима, а напряжение на шинах насосной станции восстанавливается до номинального.

При работе синхронного электродвигателя с номинальной частотой вращения заполнение напорного трубопровода сопровождается небольшими затухающими пульсациями напора в камере рабочего колеса насоса и в начале трубопровода, а также ростом статического напора до подхода потока воды к сифонному водовыпуску. Зарядка сифонного водовыпуска характеризуется гидравлическим ударом в напорном трубопроводе, затухающими колебаниями напора и мощности синхронного электродвигателя, повторным увеличением пульсаций напора. После окончания зарядки сифонного водовыпуска устанавливается рабочий напор, подача насосов, ток статора и мощность синхронного электродвигателя.

Пульсации напора в трубопроводе сохраняются, причем их величина устанавливается различной при идентичности пусков, что можно объяснить гистерезисными явлениями гидродинамических переходных процессов [12].

Анализ пусковых переходных процессов показывает, что необходимо осуществлять «плавный пуск» с небольшим и малоизменяющимся ускорением. Такой пуск синхронного электродвигателя может обеспечить схема частотного пуска и, в некоторой степени, схема с токоограничивающими реакторами и подачей тока возбуждения для синхронизации в функции скольжения и угла выбега ротора.

Существующее мнение о неприменимости реакторного пуска насосного агрегата на опорожненный напорный трубопровод [10] базируется на неправильной работе схемы управления подачей тока возбуждения синхронного электродвигателя.

Проведенные во время натурных исследований реакторные пуски снижают динамические усилия на конструктивные элементы насосного агрегата, повышают кавитационный запас на 16% по сравнению с прямым асинхронным пуском, уменьшают пульсации давления при пуске на 26%, а в установившемся режиме — на

43%. Реакторный пуск протекает «мягко» без ударов и вибраций.

Если сравнить время разворота синхронного электродвигателя до подсинхронной частоты вращения t_1 и время пуска до установившегося режима t_2 , то оно составит соответственно при прямом синхронном пуске $t_1=9,3$ с, $t_2=42$ с, реакторном — $t_1=13,6$ с, $t_2=43$ с.

Одинаковое время пуска до установившегося режима, несмотря на затяжку разворота до подсинхронной частоты вращения при реакторном пуске, объясняется уменьшением срывных явлений, выявленных при ранее проведенных натурных исследованиях [13].

Величина пульсаций давления в проточной части насосного агрегата при пуске зависит от момента подачи и величины тока возбуждения синхронного электродвигателя при его синхронизации. Применяемая на насосных станциях каскада Каршинского магистрального канала схема управления пуском синхронных электродвигателей с подачей возбуждения в функции тока и независимой выдержкой времени не обеспечивает достаточно «плавную» синхронизацию электродвигателя и приводит к увеличению пульсаций давления при пуске.

В предлагаемой нами схеме (рис. 10) синхронизация электродвигателя происходит при достижении благоприятных условий в зависимости от момента сопротивления насоса либо до шунтирования реактора, либо после. Импульс на подачу тока возбуждения (реле КВ) для синхронизации электродвигателя подается в функции скольжения s и угла выбега ротора Θ при помощи реле РПВ, включенного на часть разрядного резистора R_p через диод Д. Диод подключается так, чтобы катушка РПВ обтекалась током в ту полуволну, когда наведенная э. д. с. в обмотке возбуждения синхронного электродвигателя имеет обратную полярность по отношению к напряжению возбудителя В.

Такое включение и соответствующая настройка РПВ позволят подать импульс на синхронизацию при оптимальном мгновенном положении ротора синхронного электродвигателя и его синхронизацию при минимальных колебаниях.

Предлагаемая схема, в отличие от известных типовых схем фиксированного «легкого» или «тяжелого» пуска, в зависимости от величины момента сопротивления на валу насосного агрегата осуществляет синхронизацию электродвигателя при полном или пониженном напряжении питающей электрической сети, обеспечивая при этом наиболее «плавный» пуск синхронного электродвигателя.

Таким образом, насосные агрегаты с осевыми насосами предъявляют повышенные требования к схеме пуска синхронных электродвигателей. Этим требованиям удовлетворяет предлагаемая нами схема, обеспечивающая более надежную работу насосной станции.

Улучшению условий асинхронного и реакторного пуска синхронных электродвигателей на насосных станциях с пониженным напряжением питающей электрической сети способствует автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) электродвигателя насосного агрегата. Перевод при помощи АРВ работающих синхронных электродвигателей в режим перевозбуждения с выдачей реактивной мощности в питающую электрическую сеть

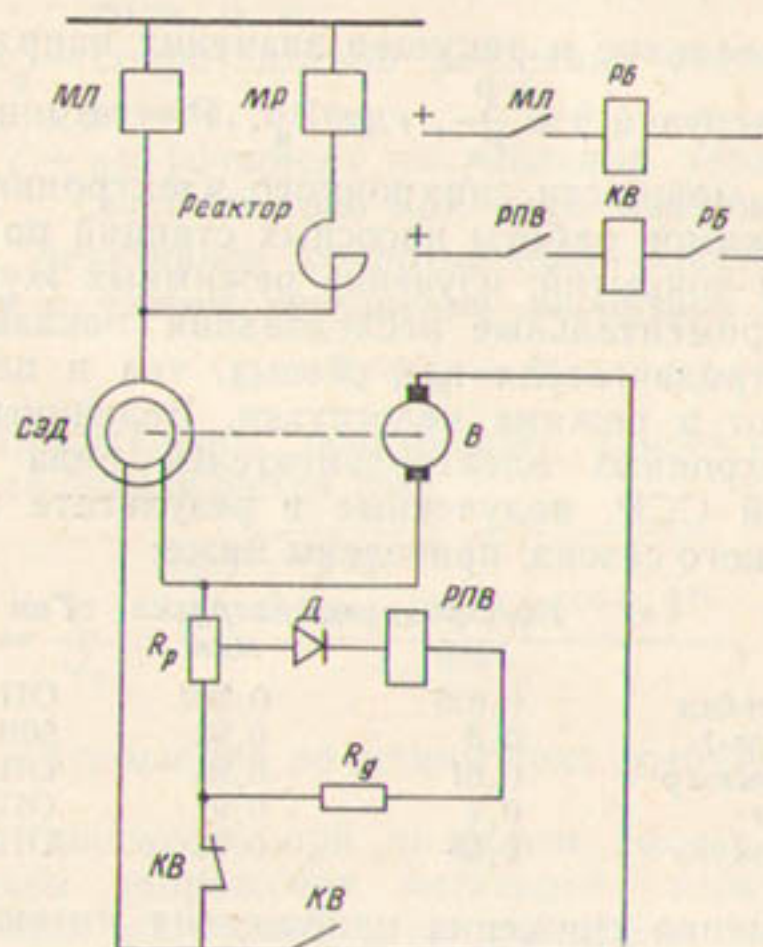


Рис. 10. Схема пуска синхронного электродвигателя насосного агрегата.

существенно повысит напряжение на шинах насосной станции. При этом улучшатся условия асинхронного или реактивного пуска очередного электродвигателя.

Однако на величину выдаваемой реактивной мощности синхронного электродвигателя, кроме напряжения питающей электрической сети и тока возбуждения электродвигателя, влияют нагрузка на валу насосного агрегата, конструктивные элементы и параметры электродвигателя. Поэтому необходимо определить влияние этих факторов на реактивную мощность синхронного электродвигателя насосного агрегата.

Исследование влияния снижения напряжения питающей электрической сети на величину реактивной мощности синхронного электродвигателя насосного агрегата имеет важное значение для оценки статической устойчивости электродвигателя и его характеристики как источника реактивной мощности, а также влияния его режима на устойчивость узла нагрузки энергосистемы.

Влияние синхронных электродвигателей насосных агрегатов на баланс реактивной мощности при снижении напряжения питающей электрической сети и постоянном значении тока возбуждения зависит от конструктивных параметров: коэффициента мощности и величины воздушного зазора, характеризуемого отношением короткого замыкания (ОКЗ), а также эксплуатационных факторов: коэффициента снижения напряжения $\gamma = \frac{U}{U_n}$, где U_n , U — номинальное и текущее значения напряжения сети; коэффициента нагрузки $\beta = \frac{P}{P_n}$, где P_n , P — номинальное и текущее значения мощности синхронного электродвигателя.

Анализ режимов работы насосных станций по графикам водопотребления и покрытий, изучение режимных журналов и проведенные экспериментальные исследования показывают, что синхронные электродвигатели как осевых, так и центробежных насосов работают в режиме недогрузки. Величины коэффициентов нагрузки синхронных электродвигателей ряда насосных станций Узбекской ССР, полученные в результате исследований в течение поливного сезона, приведены ниже:

	Коэффициент нагрузки		Тип насоса
	мин.	макс.	
Шерабад	0,625	0,937	ОП10-185
Хамза-1	0,8	0,93	56В-17
Куюмазар	0,61	0,95	ОП10-193
Алат	0,7	0,91	ОП5-110
Каракуль	0,68	0,92	ОП6-110

Расчет влияния снижения напряжения питающей электрической сети на реактивную мощность синхронного электродвигателя при постоянных значениях тока возбуждения проводился по методике [9] без учета изменения насыщения цепи электродвигателя с $ОКЗ=0,75-2,0$. Результаты расчета показали, что уменьшение реактивной мощности у синхронных электродвигателей с $ОКЗ<1,0$ при снижении напряжения питающей электрической сети тем сильнее, чем выше коэффициент нагрузки β . Увеличение реактивной мощности при снижении напряжения сети наблюдается у синхронных электродвигателей с $ОКЗ>1,0$ при относительно малых снижениях напряжения и больших недогрузках.

Расчет влияния снижения напряжения сети на реактивную мощность синхронного электродвигателя при постоянных значениях тока возбуждения с учетом изменения насыщения магнитной цепи электродвигателя проводился по методике [9, 15]. При этом коэффициент насыщения принимался равным

$$k_p = \frac{x_{ad}}{x_{ad_0}}, \quad (2.6)$$

где x_{ad} — взаимное индуктивное сопротивление по продольной оси ротора без учета изменения насыщения магнитной цепи электродвигателя, о. е.;

$x_{ad_0} = \frac{1}{OK3} - \frac{x_g}{c}$ — сопротивление продольной реакции статора при насыщении магнитной цепи электродвигателя, о. е.;

x_g — сопротивление рассеяния статора электродвигателя, о. е.;

c — коэффициент искривления характеристики холостого хода при токе возбуждения $I_{в} = I_{вх}$.

Синхронное реактивное сопротивление электродвигателя по продольной оси с учетом насыщения магнитной цепи равняется

$$x_{dн} = k_{\mu} x_{ad_0} + x_g. \quad (2.7)$$

Величина относительной реактивной мощности синхронного электродвигателя определяется так:

$$\alpha = \frac{Q}{Q_{н}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{k_{\mu} \gamma}{k_{вх}}\right)^2 - (\beta x_{dн} \cos \varphi_{н})^2}}{x_{dн} \sin \varphi_{н}}, \quad (2.8)$$

где $k_{вх} = \frac{I_{вх}}{I_{вн}}$ — отношение величины тока возбуждения электродвигателя при холостом ходе к номинальному.

При снижении напряжения питающей электрической сети степень насыщения магнитной цепи двигателя падает, что резко уменьшает намагничивающую силу, необходимую для создания рабочего магнитного потока. С увеличением намагничивающей силы обмотки статора увеличивается ток статора за счет его реактивной составляющей.

По результатам расчета построены зависимости относительной реактивной мощности от степени снижения напряжения сети при постоянном значении тока возбуждения с учетом и без учета изменения насыщения магнитной цепи синхронного электродвигателя типа ВДС-325/69-16; $P_{н} = 7,5$ мВт; $I_{сг.н.} = 505$ А; $U_{н} = 10$ кВ; $I_{вн} = 375$ А; $OK3 = 0,895$; $\cos \varphi_{н} = 0,9$ (емк.) насосной станции Шерабад (рис. 11), где также приведены зависимости относительного значения тока статора электродвигателя от степени снижения напряжения сети. Зависимости получены при параметрически заданных значениях коэффициента нагрузки синхронного электродвигателя $\beta = 0,5; 0,75; 1,0$.

Из кривых видно, что при снижении напряжения сети реактивная мощность синхронного электродвигателя возрастает независимо от ОКЗ, ее увеличение тем сильнее, чем меньше значение коэффициента нагрузки [16].

Ток статора синхронного электродвигателя с учетом и без учета изменения насыщения магнитной цепи возрастает с увеличением значения коэффициента нагрузки за счет роста величины его реактивной составляющей. Степень увеличения тока статора тем больше, чем выше значение коэффициента нагрузки электродвигателя.

При определении реактивной мощности синхронных электродвигателей насосных агрегатов, при снижении напряжения пи-

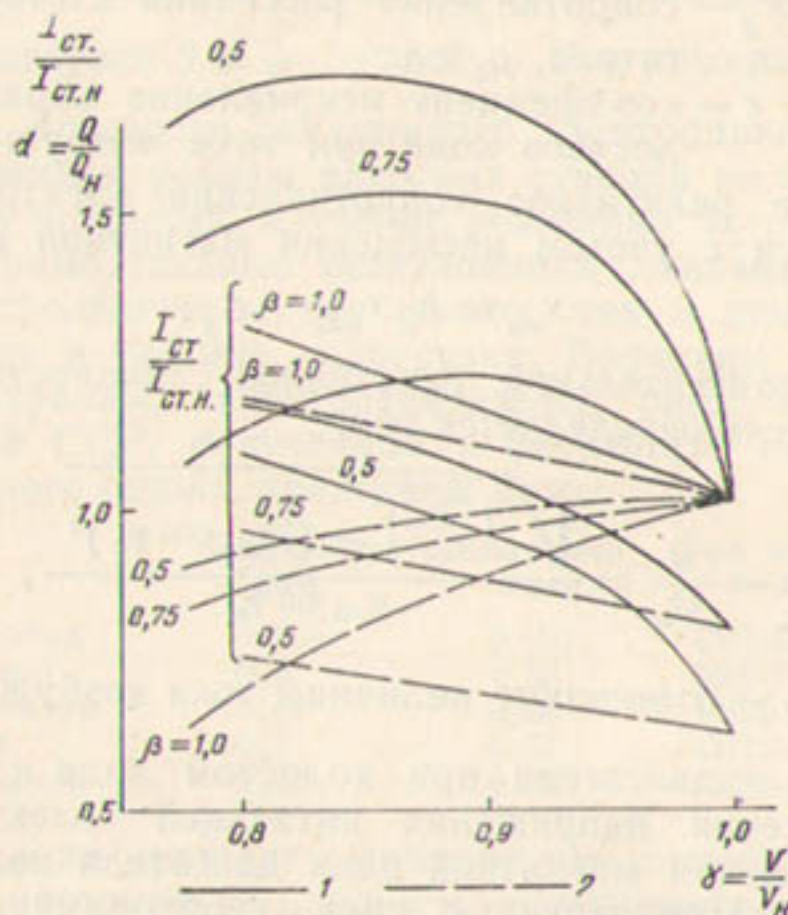


Рис. 11. Изменение реактивной мощности и тока статора синхронного электродвигателя ВДСО-325/69—16 в зависимости от снижения сети при различных нагрузках на валу.

1—с учетом изменения насыщения, 2—без учета.

тающей электрической сети, с $OK3 > 1,0$ и коэффициенте нагрузки $\beta < 0,75$ можно учитывать изменение насыщения магнитной цепи электродвигателя. Если $OK3 < 1,0$, то при любых значениях коэффициента нагрузки β необходимо учитывать изменение насыщения магнитной цепи электродвигателя, так как недоучет его изменения приводит к большим погрешностям, которые могут достигать десятков процентов.

Реактивная мощность синхронного электродвигателя определяется при условии постоянства тока возбуждения. Однако ее величина зависит от регулирования тока возбуждения электродвигателя [17]. Как было отмечено выше, синхронные электродвигатели с $OK3 < 1,0$ при отсутствии регулирования тока воз-

буждения имеют неблагоприятные характеристики по реактивной мощности.

При наличии АРВ, реагирующего на величину изменения напряжения питающей электрической сети, ток возбуждения электродвигателя будет увеличиваться при снижении напряжения и наоборот.

Кратковременное снижение напряжения питающей электрической сети требует увеличения тока возбуждения электродвигателя до максимально возможного (потолочного) значения. Для получения такой же кратности реактивной мощности для синхронных электродвигателей с $ОКЗ < 1,0$, как с $ОКЗ > 1,0$ необходимо увеличивать кратность тока возбуждения.

Таким образом, наличие АРВ улучшает характеристики синхронного электродвигателя насосного агрегата по реактивной мощности и повышает устойчивость узла нагрузки энергосистемы.

Влияние режимов работы синхронных электродвигателей насосных агрегатов на показатели насосной станции и питающей электрической сети

Основными потребителями узла нагрузки энергосистемы служат синхронные электродвигатели насосных агрегатов и, с ростом установленных мощностей насосных станций их мощности становятся соизмеримыми с мощностью электрической сети. Поэтому изменение режимов работы синхронных электродвигателей насосных агрегатов существенно влияют на различные параметры и технико-экономические показатели как питающей электрической сети, так и насосной станции.

Путем соответствующего изменения можно устанавливать различные режимы работы синхронного электродвигателя: $\cos \varphi = 1,0$; $\cos \varphi = \cos \varphi_n$ постоянные значения тока возбуждения и реактивной мощности. Для определения режима работы синхронного электродвигателя с наименьшими потерями и наибольшим кпд необходимо определить степень изменения различных параметров электродвигателя в этих режимах.

Результаты расчета на примере синхронных двигателей типа ВДС-325/69-16 насосной станции Шерабад по методике [9] при постоянстве напряжения питающей электрической сети приведены ниже.

Режим при $\cos \varphi = 1,0$; $Q = 0$:

β	$I_{\text{в}}, \text{А}$	$I_{\text{ст}}, \text{А}$	$Q, \text{кВАр}$	$\Sigma \Delta P, \text{кВт}$	$P_1, \text{кВт}$	η
0,5	220	227	0	102,5	3840	0,9734
0,75	254	340	0	121,6	5760	0,9783
1,0	295	455	0	148,7	7677	0,9806

Режим при $\cos \varphi = \cos \varphi_n$; $\frac{P_1}{Q} = \tan \varphi$; $\alpha = \beta$:

β	I_n, A	$I_{ст}, A$	$Q, \text{кВАр}$	$\Sigma \Delta P, \text{кВт}$	$P_1, \text{кВт}$	η
0,5	270	252	1860	112,7	3840	0,3708
0,75	320	278	2790	139,5	5760	0,9757
1,0	375	505	3720	176,0	7677	0,977

Режим при номинальном токе возбуждения $I_n = I_{нн}$:

β	I_n, A	$I_{ст}, A$	$Q, \text{кВАр}$	$\Sigma \Delta P, \text{кВт}$	$P_1, \text{кВт}$	η
0,5	375	406	5700	156,2	3840	0,96
0,75	375	447	4900	164	5760	0,9716
1,0	375	505	3720	176	7677	0,977

Режим при постоянном значении реактивной мощности $Q = Q_n$:

β	I_n, A	$I_{ст}, A$	$Q, \text{кВАр}$	$\Sigma \Delta P, \text{кВт}$	$P_1, \text{кВт}$	η
0,5	320	316	3720	130,1	3840	0,9664
0,75	358	406	3720	152,2	5760	0,9736
1,0	375	505	3720	176	7677	0,977

Принятые обозначения параметров и показателей синхронного электродвигателя: I_n — ток возбуждения, А; $I_{ст}$ — ток статора, А; Q — реактивная мощность, кВАр; $\Sigma \Delta P$ — суммарные потери в данном режиме, кВт; P_1 — потребляемая из сети активная мощность, кВт; η — кпд.

Сравнение приведенных выше данных показывает, что в режиме с $\cos \varphi = 1,0$ токи статора и возбуждения меньше своих номинальных значений, поэтому синхронный электродвигатель работает с наименьшими потерями и наибольшими кпд. Даже при снижении напряжения питающей электрической сети перевод синхронных электродвигателей с режима недовозбуждения в режим с $\cos \varphi = 1,0$ улучшает технико-экономические показатели насосной станции, что экспериментально проверено на примере насосной станции Шерабад.

Анализ режимных журналов показал, что напряжение на шинах насосной станции колеблется в диапазоне 8,6—9,5 кВ и синхронные электродвигатели работают в режиме недовозбуждения. При этом растет реактивная составляющая тока статора и, при постоянстве активной составляющей, растет общий ток статора, что увеличивает потери электроэнергии в синхронных электродвигателях, понижающих трансформаторах и питающей электрической сети. Это приводит к недопустимому перегреву синхронных электродвигателей, созданию дефицита реактивной мощности и снижению напряжения питающей электрической сети особенно при соизмеримости ее мощности с мощностью насосной станции.

Пониженное напряжение ухудшает энергетические показатели электроприводов различных механизмов и оборудования с асинхронными электродвигателями, а также надежность работы

систем автоматики и телемеханики объектов системы машинного водоподъема.

Экспериментальные исследования проводились при одновременной работе трех синхронных электродвигателей с коэффициентом нагрузки $\beta=0,66$. Изменяя ток возбуждения всех электродвигателей, установили режим с $\cos \varphi=1,0$. При этом напряжение на шинах насосной станции повысилось с 9 до 10 кВ.

Результаты расчетно-экспериментальных исследований, проведенных на насосной станции Шерабад, приведены ниже.

Номер насосного агрегата	I_B, A	U, kV	I_{ct}, A	$\cos \varphi$	$P_{11}, MВт$	$Q, MВАр$	$\Sigma \Delta P, кВт$	η
1	300	10	300	1,0	5,6	0	114	0,9782
3	225	10	310	1,0	5,1	0	114	0,9782
5	220	10	270	1,0	5,1	0	114	0,9782

Перевод синхронных электродвигателей с режима недовозбуждения в режим с $\cos \varphi=1,0$ уменьшает суммарные потери мощности в электродвигателе. Работая в этом режиме в течение поливного сезона (10 месяцев в году) можно сэкономить 300000 кВтч электроэнергии, что составит 3000 рублей [64].

Таким образом, изменением режимов работы синхронных электродвигателей насосных агрегатов можно значительно улучшить технико-экономические показатели насосной станции.

В связи с изменением насыщения магнитной цепи синхронного электродвигателя при различных реактивных нагрузках, более точное выражение для тока возбуждения получим графоаналитическим методом, используя диаграмму Потье и характеристику холостого хода [9].

В результате проведенного расчета построены зависимости относительной реактивной мощности α и относительного значения тока статора синхронного электродвигателя от тока возбуждения при различных значениях коэффициента нагрузки β (рис. 12). Из зависимостей видно, что имеется резерв реактивной мощности, величина которой зависит от степени загрузки электродвигателя.

При максимальной величине выдаваемой реактивной мощности ток статора не превышает номинального значения.

Согласно схеме электроснабжения насосной станции (рис. 6), напряжение на шинах подстанции А равно [19]:

$$U_A = U_B + \frac{P_B R_{\Sigma} + Q_B X_{\Sigma}}{U_B}, \quad (2.9)$$

где U_A, U_B — высшее напряжение подстанции А и В;

P_B, Q_B — потребляемая активная и реактивная мощности на шинах подстанции В;

R_{Σ}, X_{Σ} — суммарное активное и реактивное сопротивление линии и трансформатора.

При работе синхронных двигателей в режиме перевозбуждения (с выдачей реактивной мощности), неизменном напряжении на подстанции А и желательном напряжении в конце линии электропередачи $U_{ВЖ}$ связь между U_A и $U_{ВЖ}$ выражается следующим уравнением:

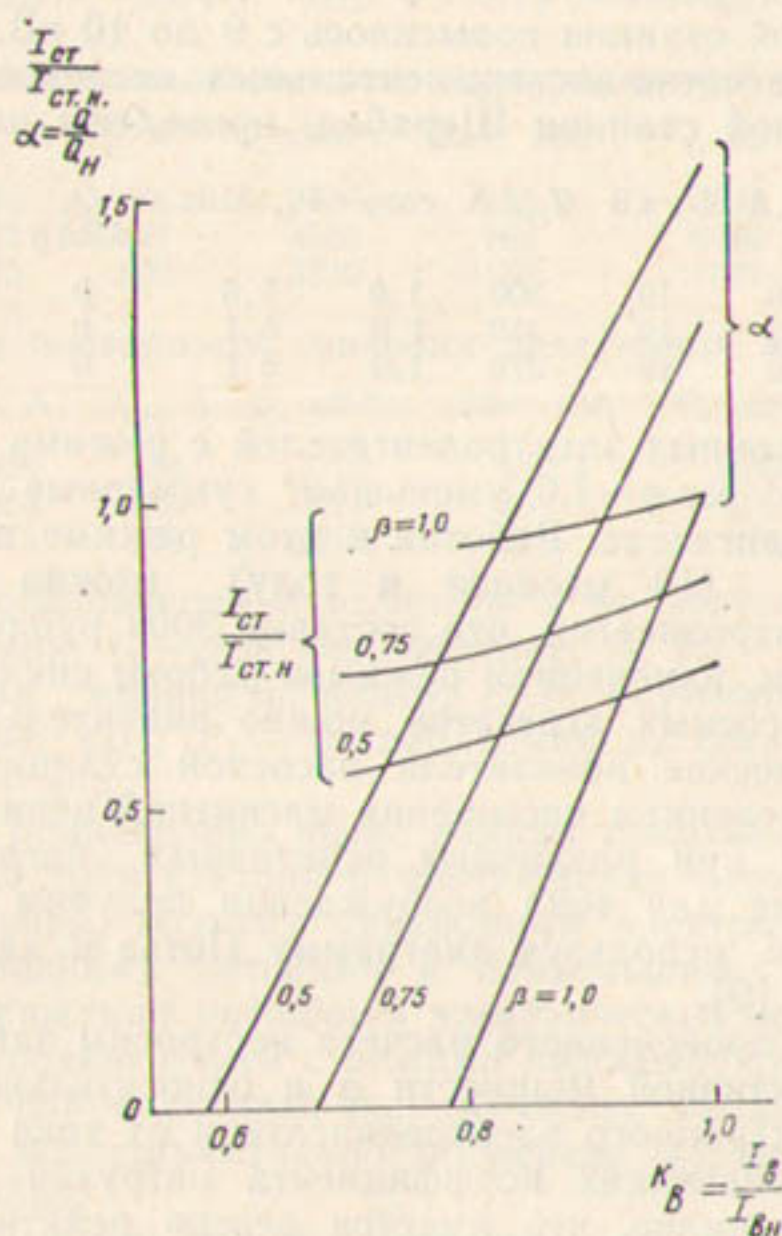


Рис. 12. Изменение реактивной мощности и тока статора синхронного электродвигателя ВДСО-325.63-16 в зависимости от тока возбуждения при различных нагрузках на валу.

$$U_A = U_{ВЖ} + \frac{P_B R_\Sigma + (Q_B - Q_{сд}) X_\Sigma}{U_{ВЖ}}, \quad (2.10)$$

где $Q_{сд} = \frac{9,81 \text{ сн}}{\eta_n \eta_d} \text{tg} \varphi$ — выдаваемая реактивная мощность синхронного электродвигателя, кВАр;
 Q , H , η_n — расход, $\text{м}^3/\text{с}$; напор, м ; кпд в рабочей точке универсальной характеристики насоса;
 η_d — кпд синхронного электродвигателя.

Приравнивая правые части уравнений (2.9) и (2.10), пренебрегая активной частью потери напряжения из-за его незначительной величины, получим

$$Q_{сд} = \frac{U_{вж} (U_{вж} - U_{в})}{X_{\Sigma}} \quad (2.11)$$

Как показали расчеты различных режимов синхронных электродвигателей по реактивной мощности в зависимости от степени загрузки при номинальных токах статора и возбуждения величина выдаваемой реактивной мощности находится в пределах (1,0—1,54) $Q_{сдн}$ — для осевых насосов (рис. 12); (1,0—1,25) $Q_{сдн}$ — для центробежных насосов, где $Q_{сдн}$ — номинальная выдаваемая реактивная мощность синхронного электродвигателя [17].

В целях проверки полученной зависимости (2.11) проведены экспериментальные исследования на насосной станции Шерабад.

По данным электрической сети Сурхандарьинской области установлено, что напряжение на подстанции А — Денау, расположенной в 77,2 км от подстанции В — Шерабад-насосная, поддерживается постоянным. Суммарное активное и реактивное сопротивление линии и понижающих трансформаторов равняются:

$$R_{\Sigma} = 11,58 \text{ Ом}; \quad X_{\Sigma} = 176 \text{ Ом}.$$

По известному коэффициенту трансформации трансформатора K , потерям напряжения в трансформаторе и необходимому напряжению на шинах низшего напряжения, можно рассчитать напряжение на высшей стороне трансформатора.

При $U_{нн} = 9,0$ кВ, $U_{в} = 212,1$ кВ, а для $U_{нн} = 10$ кВ необходимо, чтобы $U_{вж} = 219,45$ кВ.

Выдаваемая реактивная мощность синхронных электродвигателей для поднятия напряжения на шинах насосной станции с 9 кВ до 10 кВ, т. е. с $U_{в}$ до $U_{вж}$ равняется

$$Q_{сд} = \frac{219,45 (219,45 - 212,1)}{176} = 9,15 \text{ МВАр}. \quad (2.12)$$

При постоянном значении коэффициента нагрузки $\beta = 0,66$ изменяли режим работы одного, двух и трех синхронных электродвигателей.

Результаты экспериментальных исследований на насосной станции Шерабад приведены ниже:

Кол-во синхронных электродвигателей	Параметры насосной станции	
	$Q_{сд}$, МВАр	$U_{ш}$, кВ
3	+6,3	9
0	0	
2	+5,85	9,4
1	-3,86	
1	+4,2	9,75

2	—6,97	
0	0	10
3	—8,15	
0	0	10,25
3	—9,5	

(+)—режим недовозбуждения синхронных электродвигателей, (—)—режим перевозбуждения.

Отсюда видно, что изменение режимов работы как группы, так и одного синхронного электродвигателя, существенно влияет на величину напряжения питающей электрической сети. Повы-

Т а б л и ц а 3

Результаты расчетно-экспериментальных исследований на насосной станции Шерабад

Режим работы синхронных электродвигателей	$U_{ш}$, кВ	Потери активной мощности ΔP , кВт	Потери реактивной мощности ΔQ , кВАр	Экономия электрической энергии	
				$\Delta \Sigma P$, кВтч	$\Delta \Sigma Q$, кВАрч
$\cos \varphi = 0,96$ (инд)	9	700	2630	1071360	4233600
$\cos \varphi = 1,0$	10	573	2140		
$\cos \varphi = 0,86$ (емк)	10,25	542	2018	293760	1054080

шение напряжения на шинах насосной станции уменьшает потери активной и реактивной мощностей в питающей электрической сети.

Расчет данных экспериментальных исследований проводился для трех режимов работы: недовозбуждения, $\cos \varphi = 1,0$ и перевозбуждения (табл. 3).

Из табл. 3 видно, что величина потерь активной и реактивной мощностей в питающей электрической сети зависит от режимов работы синхронных электродвигателей, наименьшие потери и наибольшую экономию электроэнергии получаем в режиме перевозбуждения.

На участке электрической сети Сурхандарьинской области Шерабад-насосная — Денау экономия электроэнергии за счет изменения режимов работы синхронных электродвигателей составляет 70 тыс. руб. в течение поливного сезона [17].

Таким образом, синхронные электродвигатели насосных агрегатов можно использовать в качестве источников реактивной мощности местного или даже системного значения в зависимости от места расположения и мощности насосной станции [17, 18]. Использование синхронных электродвигателей насосных агрегатов в качестве источников реактивной мощности не требует больших капитальных затрат, кроме эксплуатационных — расходов электроэнергии, так как в этом случае используется установленное оборудование.

Для обеспечения режимов питающей электрической сети с высокими технико-экономическими показателями (минимум потерь электроэнергии, колебание напряжения и т. д.) необходимо, чтобы синхронные электродвигатели отдавали в сеть регулирующую реактивную мощность, что осуществляется регулированием возбуждения электродвигателей.

Использование синхронных электродвигателей насосных агрегатов с АРВ, настроенного на поддержание заданного режима работы электродвигателей и постоянства напряжения на шинах насосной станции, позволяет существенно повысить технико-экономические и энергетические показатели насосной станции и питающей электрической сети, что также обосновывает необходимость эксплуатации синхронных электродвигателей насосных агрегатов с АРВ.

Автоматическое регулирование возбуждения синхронных электродвигателей насосных агрегатов

В Советском Союзе и за рубежом проделана значительная работа по созданию, исследованию и разработке различных систем возбуждения и регулирования синхронных машин. Успешная разработка и внедрение различных систем возбуждения и регулирования синхронных машин обусловлены высоким уровнем развития теории автоматического управления и регулирования электрических машин, в которую значительный вклад внесли В. С. Кулебакин, М. В. Мееров, В. А. Веников, Л. В. Цукерник, Г. В. Михневич, Н. С. Сиунов, И. А. Глебов, А. А. Янко-Триницкий, Д. П. Петелин, С. И. Логинов, А. И. Лищенко и др.

Следует отметить определенные достижения Всесоюзного энергетического института им. Г. М. Кржижановского, Московского энергетического института, ВНИИЭлектромаша, Института электродинамики АН УССР, Уральского политехнического института и других организаций в деле исследования и разработки систем возбуждения, управления и регулирования синхронных машин.

В качестве систем возбуждения синхронных электродвигателей, эксплуатирующихся в различных отраслях народного хозяйства страны, применяются: с электромашинными возбудителями постоянного тока [20, 21]; ионными преобразователями тока [21, 22, 23, 24]; полупроводниковыми и магнитно-полупроводниковыми преобразователями [21, 22, 25, 26, 28, 29]; со встроенными механическими выпрямителями [20]; электромагнитными возбудителями переменного тока и полупроводниковыми вентилями (бесконтактные системы возбуждения) [28, 30, 31, 32].

При выборе системы возбуждения синхронных электродвигателей необходимо производить технико-экономическое сопоставление различных систем возбуждения [33] и определить наилучший по технико-экономическим показателям вариант.

В настоящее время для возбуждения синхронных электродвигателей насосных агрегатов используют системы с электромашиными возбудителями постоянного тока, которые установлены на одном валу с синхронными электродвигателями [34, 35]. Началось применение тиристорных возбудителей типа ТВУ и ТВ для возбуждения синхронных электродвигателей на насосных станциях Алат, каскада Джизакских насосных станций, Голодностепской, № 7 каскада Каршинского магистрального канала и других [36].

В электромашинах системах возбуждения синхронных электродвигателей ток возбуждения регулируется проводочными и ламповыми реостатами. Недостатками таких систем регулирования возбуждения являются: значительная инерционность; ограниченный потолок возбуждения; низкая степень точности регулирования; постоянная подрегулировка тока возбуждения; изменение сопротивления нити канала лампы в процессе эксплуатации. Эти недостатки ухудшают быстродействие системы возбуждения синхронных электродвигателей насосных агрегатов при различных нарушениях нормального режима эксплуатации, требуется постоянное обслуживание персонала, что в конечном счете снижает технико-экономические показатели как электродвигателя, так и питающей электрической сети.

Как было отмечено выше, наличие АРВ необходимо, чтобы синхронный электродвигатель наиболее полно использовался как электрическая машина и одновременно обеспечивались благоприятные технико-экономические показатели для питающей электрической сети. Поэтому к системам АРВ предъявляются следующие требования: 1) поддержание заданного режима работы синхронных электродвигателей; 2) сохранение устойчивой работы синхронных электродвигателей при изменении параметров питающей электрической сети; 3) выдача реактивной мощности синхронных электродвигателей для повышения напряжения и снижения потерь питающей электрической сети; 4) простота и высокая эксплуатационная надежность системы АРВ.

Тиристорные системы возбуждения синхронных электродвигателей насосных агрегатов типа ТВ снабжены устройствами АРВ, работающими по различным законам регулирования.

В зависимости от требуемых режимов работы регулирование возбуждения синхронного электродвигателя можно осуществлять [20] по законам изменения напряжения в системе электроснабжения, постоянству отдачи реактивной мощности и коэффициенту мощности $\cos \varphi$, а также по току статора, внутреннему углу θ , при минимуме потерь электроэнергии.

При этих законах параметрами регулирования могут быть напряжение сети и его производные, ток статора, активная и реактивная составляющие тока статора и их производные, внутренний угол θ и его производные, угол φ .

Анализ существующих систем регулирования возбуждения синхронных электродвигателей, работающих по различным законам АРВ, показал, что в ряде случаев целесообразно регулировать возбуждения по более сложным, комбинированным законам. Например, двухканальное управление — по напряжению и току статора электродвигателя, активной составляющей тока статора, коэффициенту мощности и др. При этом возможно построение систем АРВ, осуществляющих независимое одновременное воздействие на обмотку возбуждения обоих каналов управления, или селективное по времени воздействие каналов управления, или, наконец, воздействие одного канала, настраиваемого другим каналом управления [21].

При выборе законов регулирования возбуждения синхронных электродвигателей насосных агрегатов необходимо исходить из особенностей их эксплуатации в условиях Средней Азии и рекомендаций Всесоюзного совещания по автоматическому регулированию и системам возбуждения синхронных электродвигателей [37].

1. На предприятиях как со слабо, так и с сильно изменяющимися нагрузкой и напряжением сети следует применять АРВ на поддержание постоянства напряжения в узле нагрузки. При этом АРВ должно обеспечивать посредством параметрической или релейной фиксации достижение максимальной величины возбуждения при снижении напряжения на величину (15—20%) номинального значения.

2. Для синхронных электродвигателей, подключенных к узлу нагрузки, обеспеченному реактивной мощностью от других, более экономичных источников, возможно применение АРВ на постоянство коэффициента мощности, близкого к единице.

Исходя из приведенных рекомендаций, системы регулирования возбуждения синхронных электродвигателей могут работать по различным законам в зависимости от изменения нагрузки и напряжения питающей электрической сети.

Для определения законов регулирования возбуждения синхронных электродвигателей все насосные станции разбиты на две группы. Критерием классификации принято считать изменение уровня напряжения на шинах насосной станции. По стабильности напряжения на шинах насосные станции можно подразделить: с постоянным напряжением и непостоянным. В зависимости от этого и законы АРВ будут различными [40].

При стабильном напряжении питающей электрической сети синхронным электродвигателям целесообразно работать в режиме с $\cos \varphi = 1,0$ или $\cos \varphi = \text{const}$, заданным энергосистемой для данного узла нагрузки. Насосные станции в основном расположены в сельской местности и работают совместно с различными сельхозпотребителями с очень низким коэффициентом мощности. Для повышения коэффициента мощности узлов нагрузки с сельхозпотребителями энергосистема требует от насосных станций

поддержания заданного для данного узла нагрузки коэффициента мощности. Системы АРВ обеспечивают постоянство коэффициента мощности синхронного электродвигателя независимо от изменения напряжения питающей электрической сети и нагрузки на валу насосного агрегата [38, 39].

Таким образом, если напряжение на шинах насосной станции стабильное, целесообразно регулировать возбуждения синхронного электродвигателя на поддержание $\cos \varphi = 1,0$ или $\cos \varphi = \text{const}$, заданного энергосистемой для данного узла нагрузки.

При нестабильном напряжении на шинах насосной станции (наблюдается у некоторых насосных станций пониженное напряжение питающей электрической сети) синхронным электродвигателям целесообразно работать в режиме перевозбуждения с выдачей реактивной мощности. В этом случае кпд синхронного электродвигателя несколько ухудшается из-за увеличения потерь мощности в электродвигателе, но улучшаются показатели сети. За счет повышения напряжения на шинах насосной станции суммарные потери мощности в синхронном электродвигателе и питающей электрической сети уменьшаются.

Таким образом, если напряжение на шинах насосной станции нестабильное, целесообразнее регулировать возбуждения синхронного электродвигателя на поддержание постоянства напряжения питающей электрической сети.

Анализ возможностей схем систем АРВ показывает, что они работают по различным законам АРВ и выполняют достаточно много функций, поэтому имеют много элементов и блоков, делающих их дорогими, громоздкими и сложными в эксплуатации.

Известные устройства автоматического поддержания коэффициента мощности синхронного электродвигателя при изменении нагрузки на валу двигателя [20, 22, 41, 42] в основном используют принципы регулирования по усредненным величинам тока и напряжения статора и отклонению угла нагрузки θ .

Эти принципы регулирования осуществляют поддержание коэффициента мощности косвенным образом, так как измерительные элементы не реагируют на изменение угла фазового сдвига. В [43] осуществлен принцип регулирования в функции угла фазового сдвига вектора тока относительно вектора напряжения статора — φ , который устраняет вышеуказанный недостаток.

Применяемые схемы систем АРВ для синхронных электродвигателей насосных агрегатов из-за особенностей эксплуатации насосных станций в условиях Средней Азии имеют следующие недостатки.

Наличие транзисторного усилителя постоянного тока при резком изменении температуры окружающей среды ухудшает качество регулирования.

Сложность схем — преобразование угла φ в аналоговый регулируемый параметр и последующее преобразование в импульсы управления тиристорами — снижает надежность схем.

1. Импульсообразующий узел, состоящий из трансформаторов тока $ТТ_1$, $ТТ_2$, диодов $Д_3$, $Д_4$ и регулируемого сопротивления R_1 .

2. Полууправляемый однофазный мостовой выпрямитель (ТВ), состоящий из тиристорov T_1 , T_2 , диодов $Д_1$, $Д_2$, предохранителей $ПР_1$, $ПР_2$ и пакетного переключателя П.

3. Цепь нагрузки ТВ, состоящая из сопротивлений R_p , R_3 , R_4 , диода $Д_5$, амперметра А и сигнальной лампы Л.

Параметры элементов схемы системы АРВ приведены в [64]. Одна из особенностей предлагаемой системы заключается в том, что импульсы, необходимые для открывания тиристорov, образуются от трансформаторов тока. Известно, что первичная обмотка трансформатора тока состоит из одного или небольшого числа витков относительно большого сечения и включается последовательно в цепь измеряемого тока, вторичная — из большого числа витков сравнительно малого сечения и замыкается на приборе.

В приведенном трансформаторе тока ток во вторичной обмотке равен

$$I_2^1 = \frac{z_m I_1}{z_m + z_2^1 + z_m^1}, \quad (2.13)$$

где I_1 — ток в первичной обмотке, А;

z_m — полное сопротивление взаимной индукции, Ом;

z_2^1 — приведенное полное сопротивление вторичной обмотки, Ом;

z_m^1 — приведенное значение сопротивления нагрузки во вторичной цепи, Ом.

Обычно значение действительного (не приведенного) сопротивления нагрузки не более 0,4 Ом, поэтому напряжение на нагрузке равно 1—2 В. Такой режим работы трансформатора тока является рабочим, близким к режиму короткого замыкания, а форма кривой тока и напряжения во вторичной цепи трансформатора тока близка к синусоиде. С увеличением сопротивления нагрузки форма кривой напряжения на выходе теряет синусоидальность и приближается к форме импульса. Для открывания тиристорov требуется импульс с амплитудой 8 В при токе нагрузки до 400 мА. Подбором значения сопротивления нагрузки на выходе трансформатора тока можно получить импульс требуемой величины.

Известно, что нельзя допускать размыкания вторичной цепи трансформатора тока, так как при этом размагничивающее действие вторичного тока исчезает, и магнитный поток возрастает в десятки раз. Он может выйти из строя из-за пробоя изоляции или чрезмерного нагрева сердечника в результате увеличения магнитных потерь. Такая опасность в предлагаемой системе АРВ отсутствует, так как первичные обмотки трансформаторов тока

ТТ₁ и ТТ₂ включаются последовательно к измерительным приборам, которые присоединены ко вторичной обмотке трансформатора тока ТТ одной из фаз статора синхронного электродвигателя.

Сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока ТТ₁ и ТТ₂ малы, поэтому на номинальную работу трансформатора тока ТТ существенно не влияют. Максимальное значение тока во вторичной обмотке трансформатора тока ТТ не более 3 А. При параллельном соединении первичных обмоток трансформаторов тока ТТ₁ и ТТ₂ значение тока, протекающего в каждой из них, не более 1,5 А. Коэффициент трансформации по току при нормальном рабочем режиме трансформаторов тока ТТ₁ и ТТ₂ равен 3, поэтому при значении тока в первичной обмотке, равном 1,5 А, в них магнитный поток чрезмерно не возрастал и сердечник не нагревался выше допустимого, а значение тока во вторичной обмотке 0,5 А.

Практика показала, что нагрузка во вторичной обмотке достаточна для того, чтобы при пикообразной форме напряжения с амплитудой не более 8—10 В магнитный поток чрезмерно не увеличивался и сердечник не перегревался. Тиристоры выпрямителя отпираются с помощью импульсов, получаемых от трансформаторов тока ТТ₁ и ТТ₂. На вход ТВ подводится напряжение сети, куда включены обмотки статора синхронного электродвигателя, импульсы непосредственно связаны с током фазы статора, тогда напряжение на выходе ТВ будет пропорциональным коэффициенту мощности электродвигателя.

Если выход ТВ подключить к зажимам сопротивления R_p , регулирующего ток возбуждения возбудителя синхронного электродвигателя, и согласовать его полярность с полярностью падения напряжения на R_p от тока возбуждения, то увеличению тока ТВ будет соответствовать уменьшение тока возбуждения возбудителя и наоборот.

Этот процесс доказывается с помощью уравнения равновесия напряжения по цепи возбуждения возбудителя следующим образом

$$E_a - (I_a - I_{\text{вв}}) R_a = I_{\text{вв}} R_{\text{в}} + (I_{\text{вв}} + I_p) R_p, \quad (2.14)$$

где E_a — ЭДС якоря возбудителя, В;

I_a — ток возбудителя синхронного электродвигателя, А;

$I_{\text{вв}}$ — ток возбуждения возбудителя, В;

R_a — сопротивление якоря возбудителя, Ом;

$R_{\text{в}}$ — сопротивление обмотки возбуждения возбудителя, Ом;

R_p — сопротивление регулировочного реостата в цепи обмотки возбуждения возбудителя, Ом;

I_p — ток системы АРВ, определяемый напряжением выхода ТВ.

Ток возбуждения синхронного электродвигателя определяется из выражения

$$I_v = \frac{E_a - I_{vv} R_a}{R_2 + R_a}, \quad (2.15)$$

где R_2 — сопротивление обмотки возбуждения ротора синхронного электродвигателя, Ом.

Подставляя (2.15) в (2.14), ток возбуждения возбудителя будет равен

$$I_{vv} = \frac{E_a - I_v R_a - I_p R_p}{R_v + R_p + R_a}. \quad (2.16)$$

Из (2.16) видно, что при изменении тока I_p меняется ток I_{vv} . Характер изменения тока I_p определяется законом изменения коэффициента мощности синхронного электродвигателя.

При изменении нагрузки на валу синхронного двигателя фаза тока статора относительно напряжения будет изменяться. При этом импульс во вторичной обмотке трансформатора тока также будет изменяться по фазе относительно фазы выходного напряжения ТВ. С увеличением нагрузки на валу соответственно коэффициент мощности и выпрямленное напряжение ТВ уменьшаются. Это приводит к уменьшению тока I_p и увеличению тока возбуждения возбудителя, что повышает ЭДС якоря возбудителя, который в свою очередь приводит к увеличению тока возбудителя синхронного электродвигателя и тем самым поддерживается заданное значение коэффициента мощности.

При уменьшении нагрузки на валу синхронного электродвигателя соответственно коэффициент мощности и выпрямленное напряжение ТВ увеличиваются и это, в конечном счете, приводит к тому, что ток возбуждения электродвигателя уменьшается и поддерживается заданное значение коэффициента мощности. Благодаря такой обратной связи, обеспечивается автоматическое поддержание заданного значения коэффициента мощности синхронного электродвигателя. Выражение (2.16) позволяет только качественно судить о влиянии тока I_p на ток I_{vv} .

Для количественного определения установившегося значения тока возбудителя необходимо учитывать изменение ЭДС якоря возбудителя, что обычно производится графическим путем по кривой холостого хода возбудителя. Аналитический учет изменения ЭДС якоря возбудителя возможен путем аппроксимации кривой холостого хода. Для этого принимаем следующие допущения:

1. При $I_v = 0$, $E_a = 0$
2. Максимальное значение ЭДС якоря по кривой холостого хода соответствует режиму синхронного электродвигателя с $\cos \varphi = 0,9$ (ёмк) при $P = P_n$, т. е. $E_{a \max} = E_{vn}$, $I_{v \max} = I_{vn}$
3. Кривая холостого хода в диапазоне изменения тока возбуждения возбудителя в пределах $0 \leq I_{vv} \leq I_{vnn}$ описывается уравнением

$$E_{\text{я}} = E_{\text{ян}} - (I_{\text{ввн}} - I_{\text{вв}})^2 \frac{E_{\text{ян}}}{I_{\text{ввн}}^2}. \quad (2.17)$$

Подставляя выражения (2.15) и (2.17) в (2.14), определим установившееся значение тока возбуждения возбудителя, соответствующее току системы АРВ I_p

$$I_{\text{вв}}^2 + I_{\text{вв}} \left\{ 2 - \frac{[E_{\text{я}} + (R_{\text{в}} + R_p + R_{\text{я}})(R_2 + R_{\text{я}})] I_{\text{ввн}}^2}{(1 - R_2 - R_{\text{я}}) E_{\text{ян}}} \right\} - \frac{R_p (R_2 + R_{\text{я}}) I_{\text{ввн}}^2 I_p}{(1 - R_2 - R_{\text{я}}) E_{\text{ян}}} = 0. \quad (2.18)$$

При известном токе возбуждения возбудителя установившееся значение тока возбуждения синхронного электродвигателя можно определить из выражения

$$I_{\text{в}} = \frac{2 \frac{E_{\text{ян}}}{I_{\text{ввн}}} - R_{\text{я}} - I_{\text{вв}} \frac{E_{\text{ян}}}{I_{\text{ввн}}^2}}{R_2 + R_{\text{я}}} \cdot I_{\text{вв}}. \quad (2.19)$$

Выражения (2.18) и (2.19) позволяют аналитически исследовать свойства выбранного способа АРВ синхронного двигателя на поддержание постоянства заданного значения коэффициента мощности при изменении нагрузки на валу электродвигателя.

Ток системы АРВ I_p с напряжением на выходе ТВ имеет следующую зависимость

$$I_p = \frac{U_p - I_{\text{вв}} R_p}{R_p}. \quad (2.20)$$

В свою очередь напряжение на выходе ТВ равно

$$U_p = U_{d_0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \quad (2.21)$$

где U_{d_0} — среднее значение выпрямленного напряжения, В;

α — угол регулирования.

Угол регулирования

$$\alpha = \alpha_{\text{н}} + \varphi, \quad (2.22)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ — начальное значение угла регулирования. Из выражений (2.20), (2.21), (2.22) и (2.18) получим выражения для тока возбуждения возбудителя и тока возбуждения синхронного электродвигателя непосредственно через угол φ .

После подстановки и решения полученного уравнения имеем

$$I_{\text{вв}} = -1 - \frac{[R_p (R_2 + R_{\text{я}}) - R_{\text{я}} - (R_{\text{в}} + R_p + R_{\text{я}})(R_2 + R_{\text{я}})] I_{\text{ввн}}^2}{2(1 - R_2 - R_{\text{я}}) E_{\text{ян}}} \pm$$

$$\pm \sqrt{\left\{1 + \frac{[R_p(R_2 + R_{я}) - R_{я} - (R_{в} + R_p + R_{я})(R_2 + R_{я})] I_{внн}^2}{2(1 - R_2 - R_{я}) E_{ян}}\right\}^2 + \dots + \frac{(R_2 + R_{я}) I_{внн}^2 U_{d0} (1 - \sin \varphi)}{2(1 - R_2 - R_{я}) E_{ян}}}$$
(2.23)

Подставив выражение (2.23) в (2.19), получим выражение тока возбуждения синхронного электродвигателя через угол φ

$$I_{в} = \frac{\left[2 \frac{E_{ян}}{I_{внн}} R_{я} - \left\{ -1 - \frac{[R_p(R_2 + R_{я}) - R_{я} - (R_{в} + R_p + R_{я})(R_2 + R_{я})] I_{внн}^2}{2(1 - R_2 - R_{я}) E_{ян}} \right\} \pm \sqrt{\left\{1 + \frac{[R_p(R_2 + R_{я}) - R_{я} - (R_{в} + R_p + R_{я})(R_2 + R_{я})] I_{внн}^2}{2(1 - R_2 - R_{я}) E_{ян}}\right\}^2 + \dots + \frac{(R_2 + R_{я}) I_{внн}^2 U_{d0} (1 - \sin \varphi)}{2(1 - R_2 - R_{я}) E_{ян}}} \right]}{R_2 + R_{я}}$$

$$\pm \sqrt{\left\{1 + \frac{[R_p(R_2 + R_{я}) - R_{я} - (R_{в} + R_p + R_{я})(R_2 + R_{я})] I_{внн}^2}{2(1 - R_2 - R_{я}) E_{ян}}\right\}^2 + \dots + \frac{(R_2 + R_{я}) I_{внн}^2 U_{d0} (1 - \sin \varphi)}{2(1 - R_2 - R_{я}) E_{ян}}}$$

$$\times \left\{ -1 - \frac{[R_p(R_2 + R_{я}) - R_{я} - (R_{в} + R_p + R_{я})(R_2 + R_{я})] I_{внн}^2}{2(1 - R_2 - R_{я}) E_{ян}} \right\} \pm \sqrt{\left\{1 + \frac{[R_p(R_2 + R_{я}) - R_{я} - (R_{в} + R_p + R_{я})(R_2 + R_{я})] I_{внн}^2}{2(1 - R_2 - R_{я}) E_{ян}}\right\}^2 + \dots + \frac{(R_2 + R_{я}) I_{внн}^2 U_{d0} (1 - \sin \varphi)}{2(1 - R_2 - R_{я}) E_{ян}}}$$
(2.24)

Ток возбуждения синхронного электродвигателя выражается через ток статора [45]:

$$I_{в} = \frac{K_{пр} \left[z + x_{ад} + z_G + \frac{(x_{ад} - x_{аг})(r + r_1)}{x + x_g - (r + r_1)} \right] I_{ст}}{x_{ад}} \quad (2.25)$$

где $K_{пр}$ — коэффициент приведения;

z — полное сопротивление нагрузки синхронного электродвигателя, Ом;

z_G — полное сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом;

x, r — реактивное и активное сопротивления нагрузки, Ом;

r_1 — активное сопротивление обмотки статора, Ом;

Подставив выражение (2.25) в (2.24), получим выражение тока статора синхронного электродвигателя через угол φ

$$\begin{aligned}
 I_{\text{ст}} \cdot K_{\text{нр}} & \left[z + x_{ad} + z_G + \frac{(x_{ad} - x_{eq})(r + r_1)}{x + x_{eq} - (r + r_1)} \right] = \\
 & \frac{x_{ad}}{\left[2 \frac{E_{\text{ян}}}{I_{\text{ввн}}} - R_{\text{я}} - \right.} \\
 & \left. - \left\{ -1 - \frac{[R_p(R_2 + R_{\text{я}}) - R_{\text{я}} - (R_{\text{в}} + R_p + R_{\text{я}})(R_2 + R_{\text{я}})] I_{\text{ввн}}^2}{2(1 - R_2 - R_{\text{я}}) E_{\text{ян}}} \right\} \right] \pm \\
 & = \frac{R_2 + R_{\text{я}}}{\pm \sqrt{\left\{ 1 + \frac{[R_p(R_2 + R_{\text{я}}) - R_{\text{я}} - (R_{\text{в}} + R_p + R_{\text{я}})(R_2 + R_{\text{я}})] I_{\text{ввн}}^2}{2(1 - R_2 - R_{\text{я}}) E_{\text{ян}}} \right\}^2 +}} \\
 & \frac{\dots + \frac{(Q_2 + R_{\text{я}}) I_{\text{ввн}}^2 U_{d_0} (1 - \sin \varphi)}{2(1 - R_2 - R_{\text{я}}) E_{\text{ян}}} \left\{ \frac{E_{\text{ян}}}{I_{\text{ввн}}^2} \right\}}{1} \times \\
 & \times \left\{ -1 - \frac{[R_p(R_2 + R_{\text{я}}) - R_{\text{я}} - (R_{\text{в}} + R_p + R_{\text{я}})(R_2 + R_{\text{я}})] I_{\text{ввн}}^2}{2(1 - R_2 - R_{\text{я}}) E_{\text{ян}}} \right\} \pm \\
 & \sqrt{1 + \frac{[R_p(R_2 + R_{\text{я}}) - R_{\text{я}} - (R_{\text{в}} + R_p + R_{\text{я}})(R_2 + R_{\text{я}})] I_{\text{ввн}}^2}{2(1 - R_2 - R_{\text{я}}) E_{\text{ян}}} \right\}^2 +} \\
 & \frac{\dots + \frac{(R_2 + R_{\text{я}}) I_{\text{ввн}}^2 U_{d_0} (1 - \sin \varphi)}{2(1 - R_2 - R_{\text{я}}) E_{\text{ян}}}}{1} . \quad (2.26)
 \end{aligned}$$

Подставив в (2.26) значения параметров возбuditеля и синхронного электродвигателя, которые даны в относительных единицах, получим выражение тока статора через угол φ .

По характеристикам холостого хода синхронного двигателя типа ВДСО-325/69—16 насосной станции Шерабад принимаем $I_{\text{вб}} = I_{\text{в0}} = 196 \text{ A}$, возбuditеля типа ВВС-74/29—6 принимаем $I_{\text{ввб}} = I_{\text{вв0}} = 5 \text{ A}$, $E_{\text{яб}} = E_{\text{я0}} = 83 \text{ В}$,

$$z_0 = z_{\text{0}} = \frac{E_{\text{я0}}}{I_{\text{в0}}} = \frac{83}{196} = 0,4234.$$

Конечное выражение тока статора синхронного электродвигателя через угол φ имеет вид

$$I_{\text{ст}} = -a - b \sin \varphi - c \sqrt{2,59 - 2,58 \sin \varphi}, \quad (2.27)$$

где a , b , c — коэффициенты, величины которых зависят от режима работы, параметров возбудителя и синхронного электродвигателя.

Величины этих коэффициентов при различных режимах работы и коэффициента нагрузки $\beta=1,0$ синхронного электродвигателя приведены ниже:

Коэффициент мощности	a	b	c
0,9 (емк)	0,3248	0,2745	0,7037
0,95 (емк)	0,323	0,2726	0,6986
1,0	0,3867	0,3212	0,8233
0,95 (инд)	0,3892	0,4654	0,8432
0,9 (инд)	0,5506	0,4654	1,193

Необходимый коэффициент мощности в предлагаемой системе АРВ можно установить следующими способами: включением потен-

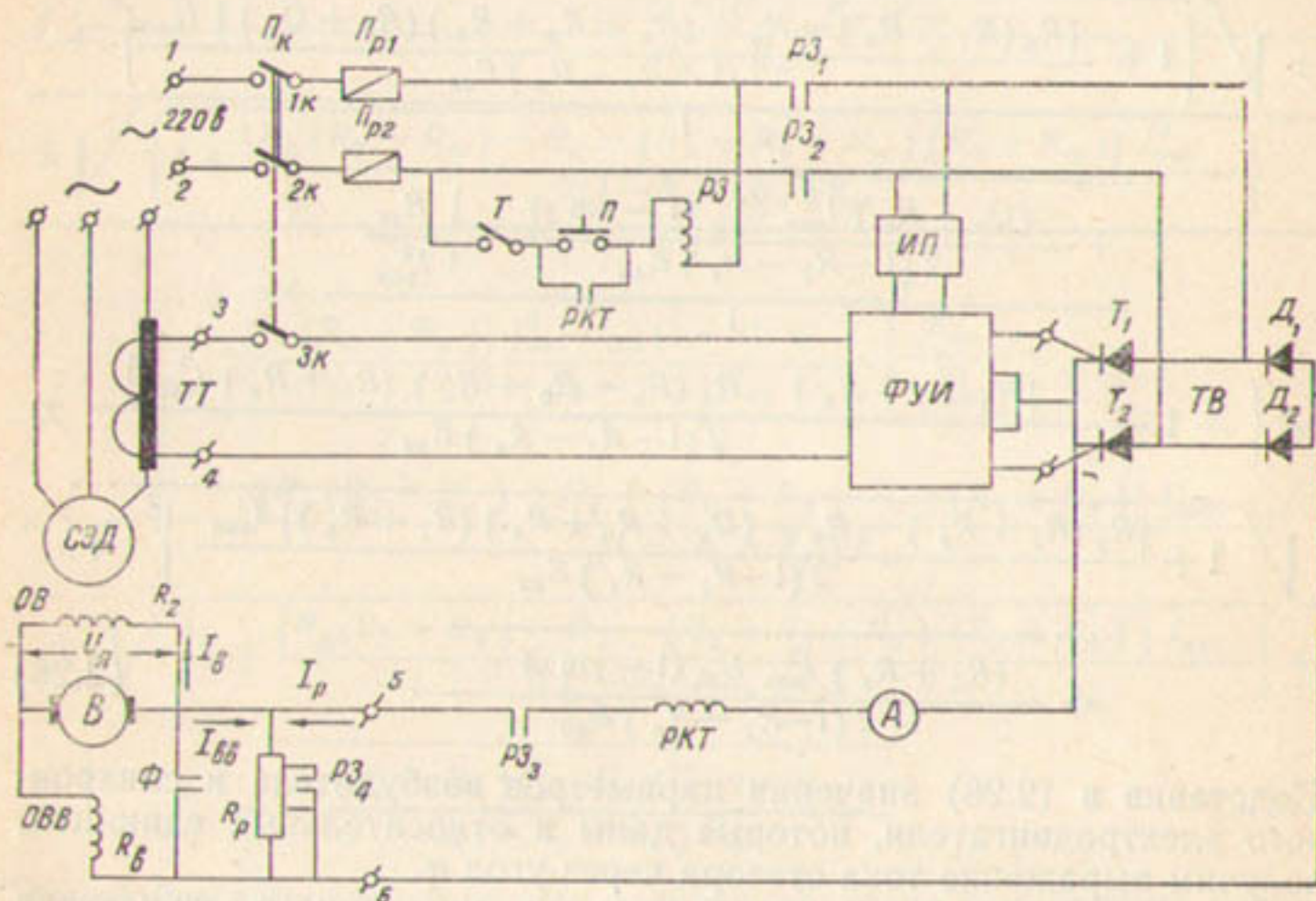


Рис. 14. Схема системы АРВ синхронного электродвигателя насосного агрегата на поддержание постоянства коэффициента мощности.

циометра к выходу ТВ; регулированием амплитуды входного напряжения ТВ; перемещением движка регулировочного реостата R_3 , как принято в системе АРВ; включением между трансформатором тока ТТ и управляющими электродами тиристоров ТВ формирователя управляющих импульсов (при этом повышается точность и плавность регулирования установки по $\cos \phi$).

Второй вариант схемы системы АРВ на поддержание заданного коэффициента мощности синхронных электродвигателей насосных агрегатов приведен на рис. 14.

Система включает следующие узлы и элементы: 1) формирователь управляющих импульсов (ФУИ); 2) полууправляемый однофазный тиристорный выпрямитель (ТВ), состоящий из тиристоров T_1 , T_2 , диодов D_1 , D_2 ; 3) источник питания; 4) пуско-защитную аппаратуру.

Параметры элементов схемы системы АРВ приведены в [64]. Принципиальные схемы ФУИ и его источника питания показаны на рис. 15, 16.

Формирователь управляющих импульсов состоит из входных потенциометров, триггера Шмидта [46, 47] и усилителя мощности.

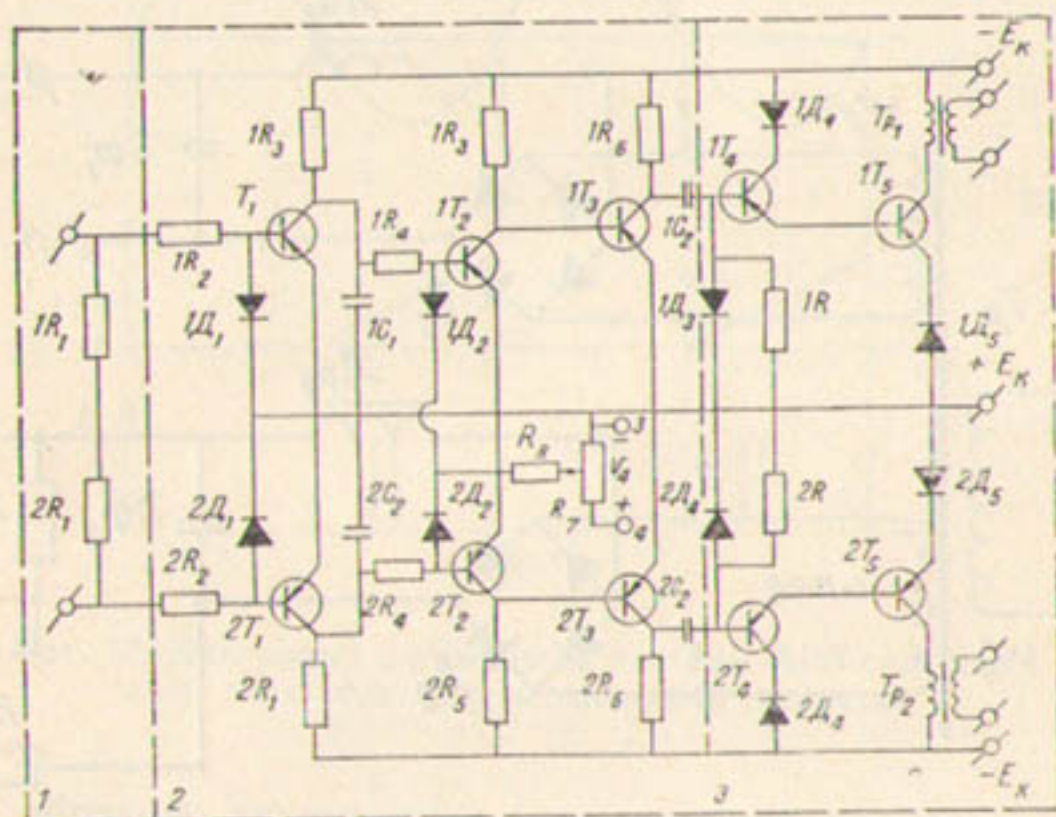


Рис. 15. Принципиальная схема формирователя управляющих импульсов.

1—входные потенциометры, 2—триггер Шмидта, 3—усилитель мощности.

Синусоидальный сигнал, снимаемый со вторичной обмотки трансформатора тока ТТ, подается на потенциометры ФУИ, с помощью которых можно установить требуемую для ФУИ величину синусоидального сигнала.

Особенности ФУИ заключаются в следующем.

1. Синусоидальный сигнал преобразуется в сигнал пилообразной формы, передний фронт которого нарастает медленно по экспоненциальному закону и начало соответствует началу полупериода синусоидального сигнала, а задний фронт круто изменяется до нуля. Максимальная величина пилообразного напряжения зависит от напряжения источника питания, конденсатора C_1 и резистора R_3 .

2. Пилообразный сигнал с помощью триггера Шмидта преобразуется в сигнал прямоугольной формы, частота которого соответствует частоте синусоидального сигнала. Особенностью данного триггера является то, что начало момента отпираания три-

ода $1T_2$ ($2T_2$) можно изменять с помощью напряжения, снимаемого с потенциометра R_7 . При этом ошибка регулирования не зависит от колебания амплитуды сигнала, снимаемого с трансформатора тока ТТ.

3. Начало прямоугольных сигналов можно перемещать относительно начала фазного тока с помощью напряжения управления U_y .

Благодаря такой схеме формирователя импульсов на его выходе получаем прямоугольный импульс, передний фронт которого соответствует при напряжении управления $U_y=0$ началу фаз-

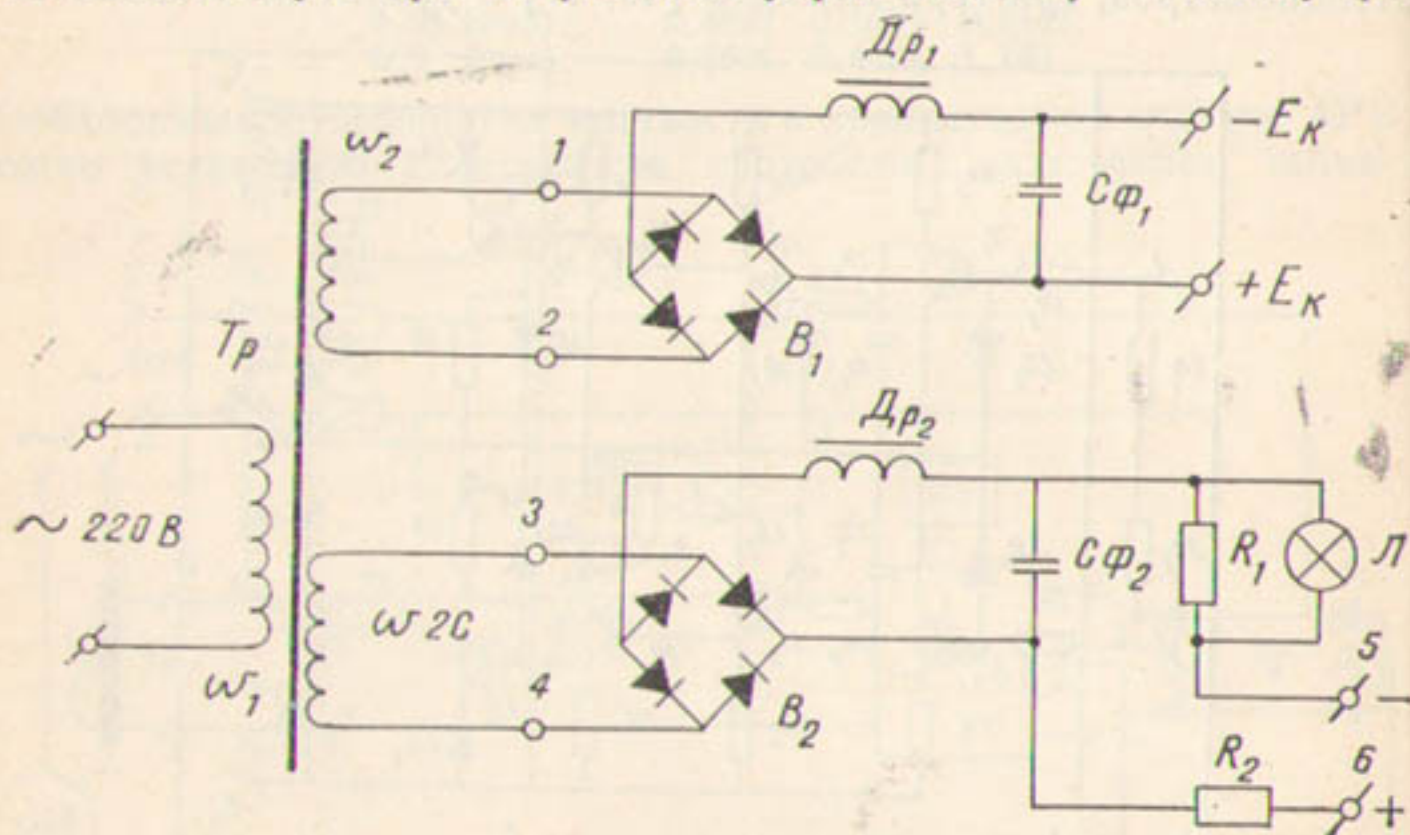


Рис. 16. Схема источника питания формирователя управляющих импульсов

ного тока. Колебания амплитуды синусоидального сигнала не влияют на передний фронт прямоугольного импульса управления. Прямоугольные импульсы, после дифференцирования $R-C$ цепочкой и усиления усилителем, подаются на управляющие электроды тиристоров ТВ.

Выходное напряжение ТВ зависит от моментов подачи импульсов управления, которые зависят от начала полупериода синусоидального сигнала, что в свою очередь зависит от фазового угла фазного тока. Поэтому величина выходного напряжения ТВ также зависит от фазового угла фазного тока.

Ток обмотки возбуждения возбудителя зависит от разности напряжения якоря возбудителя и напряжения, подаваемого от ТВ на регулировочное сопротивление R_p при его постоянной величине. Величина R_p выбирается из условия равенства коэффициента мощности синхронного электродвигателя $\cos \varphi = 0,9$ (емк) и выходного напряжения ТВ, равного нулю. Необходимая вели-

чина коэффициента мощности задается путем подачи напряжения управления U_y , вследствие чего появляется выходное напряжение ТВ и уменьшается разность напряжения на обмотке возбуждения возбудителя, следовательно, уменьшается напряжение на якоре возбудителя и ток возбуждения синхронного электродвигателя. Одновременно с этими процессами будет уменьшаться фазовый угол фазового тока, а значит и напряжение на выходе ТВ.

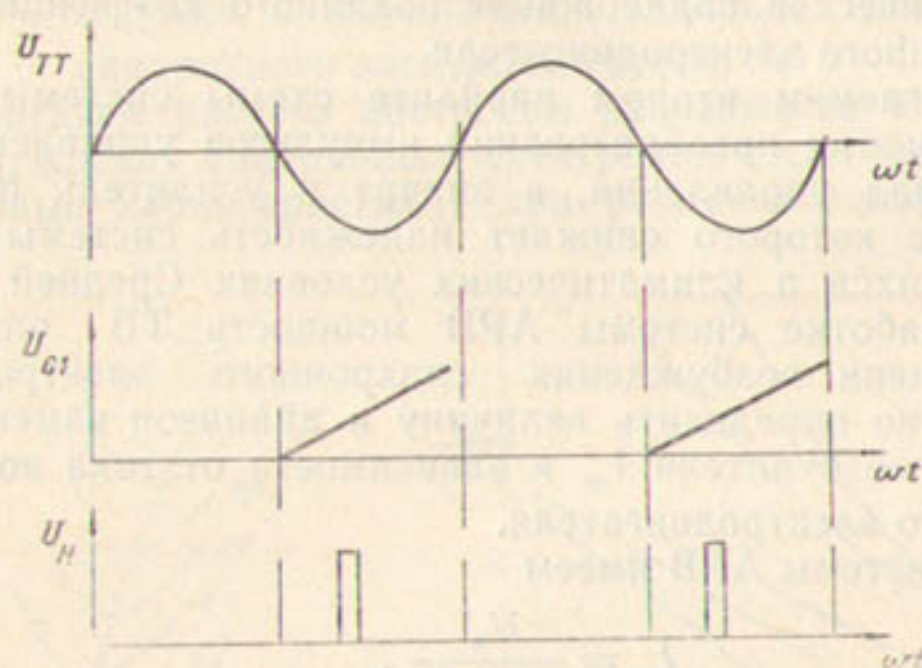


Рис. 17. Диаграмма напряжений системы АРВ синхронного электродвигателя насосного агрегата.

Таким образом установится определенная разность напряжений на обмотке возбуждения возбудителя, следовательно, и ток возбуждения и коэффициент мощности синхронного электродвигателя, соответствующие данной величине напряжения управления.

Формы кривой напряжения на выходе трансформатора тока ТТ и импульса управления представлены на рис. 17.

При изменении нагрузки на валу синхронного электродвигателя фаза тока относительно фазы напряжения будет изменяться. Импульс на выходе ФУИ также будет изменяться на фазе относительно фазы выходного напряжения ТВ.

С увеличением нагрузки на валу синхронного электродвигателя соответственно уменьшается выпрямленное напряжение ТВ. Это уменьшает падение напряжения на регулировочном реостате R_p и увеличивает ток возбуждения возбудителя, что соответствует повышению напряжения якоря возбудителя и увеличению тока возбудителя синхронного электродвигателя и таким образом поддерживается заданное значение коэффициента мощности.

При уменьшении нагрузки на валу синхронного электродвигателя выпрямленное напряжение ТВ растет и это, в конечном

В натуральных условиях также проведены экспериментальные исследования для определения точности поддержания коэффициента мощности синхронного электродвигателя.

Система АРВ включалась в схему действующего синхронного электродвигателя насосного агрегата и устанавливалось заданное значение коэффициента мощности, затем изменением угла разворота лопастей осевого насоса менялась нагрузка на валу. Изменения различных параметров фиксировались измерительными приборами.

Приведены изменения параметров синхронного электродвигателя при различных режимах с системой АРВ:

P_1 , кВт	500	375	775	800
Q , кВАр	60	90	115	120
I_n , А	80	89	90	92
I_p , А	1,25	1,2	1,175	1,15
$\cos\varphi$	0,9925	0,991	0,99	0,9875

Изменения параметров синхронного электродвигателя при различных режимах без системы АРВ:

P_1 , кВт	500	675	775	800
Q , кВАр	215	206	110	0
I_n , А	100	114	120	126
$\cos\varphi$	0,92	0,995	0,99	1,0

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что при изменении нагрузки на валу синхронного электродвигателя заданное значение коэффициента мощности с системой АРВ поддерживается постоянным — с точностью 0,5%. При изменении нагрузки на валу от 500 до 800 кВт, без системы АРВ, разница между заданными и полученными значениями коэффициента мощности составляет около 8%.

Разработанная нами система АРВ внедрена на насосных станциях Шерабад Шерабадского машинного канала, Хамза-1 и Куюмазар Аму-Бухарского машинного канала, Алат и Каракуль Аму-Каракульского машинного канала. Экономический эффект от внедрения систем АРВ на этих насосных станциях составляет 125 тыс. руб. в год.

Продолжительная опытно-промышленная эксплуатация разработанных систем АРВ на насосных станциях показала их полную работоспособность, что позволило рекомендовать их для синхронных электродвигателей насосных агрегатов.

Глава III. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМ МАШИННОГО ВОДОПОДЪЕМА

Математические модели и структурные схемы подводящих и отводящих каналов

Процесс управления режимами работы подводящих и отводящих каналов можно представить как стабилизацию стационарных (в общем случае квазистационарных) режимов, поэтому в процессе управления необходимо рассчитывать стационарные режимы и управляющие воздействия при переходе от одного режима к другому и в аварийных ситуациях, для чего необходимо иметь соответствующие модели.

На основе математических моделей могут быть разработаны системы автоматического регулирования (САР) уровней воды в подводящих и отводящих каналах и их параметры, обеспечивающие поддержание заданных режимов работы каналов.

Обеспечение заданных режимов эксплуатации требует прежде всего решения задач нестационарного движения воды в подводящем и отводящем каналах.

Известно, что процессы в открытых каналах и руслах рек описываются дифференциальными уравнениями в частных производных при наличии сложных граничных и начальных условий [1, 14, 57, 58].

Задача расчета неустановившегося движения воды в открытых руслах, описываемого уравнениями Сен-Венана, заключается в определении расхода и отметок уровня воды в рассматриваемых створах в зависимости от их положения и времени.

Уравнения Сен-Венана относятся к дифференциальным уравнениям в частных производных гиперболического типа [57]

$$i - \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{V^2}{c^2 R} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \alpha \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\alpha - 1}{g} \frac{V}{F} \frac{\partial F}{\partial t}, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial VF}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = 0, \quad (3.2)$$

где H — глубина потока от оси x ;
 $i = \sin \delta$ — синус угла наклона δ оси к горизонту;
 V — средняя по сечению скорость потока;
 C — коэффициент Шези;
 R — гидравлический радиус потока;
 g — ускорение силы тяжести;
 α — полный корректив количества движения;
 F — площадь сечения потока.

где $z \rightarrow \xi = \frac{\Delta h}{h}$ — изображение изменения глубины в любом створе канала;

$A \rightarrow \alpha = \frac{\Delta a}{a}$ — изображение отклонения открытия затвора

$$\mathbb{W}_i(p) = \frac{L_i p + K_i}{T_i p + K_i}; \quad p = \frac{d}{dt};$$

τ_i — время запаздывания, с;

$$N_n = \frac{a_2}{Q_2} \frac{\partial Q_2}{\partial a_2}; \quad N_k = \frac{a_1}{Q_1} \frac{\partial Q_1}{\partial a_1};$$

$$R_n = \frac{h_2}{Q_2} \frac{\partial Q_2}{\partial h_2}; \quad R_k = \frac{h_1}{Q_1} \frac{\partial Q_1}{\partial h_1};$$

z_i — изображение отклонения глубины со стороны примыкающего бьефа;

$$x_1 = \left(\frac{h}{Q_1} \frac{\partial Q_1}{\partial h_k} - \frac{Bh}{\omega} \right) \frac{V}{g}, \quad x_2 = \left(\frac{h}{Q_2} \frac{\partial Q_2}{\partial h_n} - \frac{Bh}{\omega} \right) \frac{V}{g};$$

$$\gamma_{10} = \frac{1}{\gamma_{20}} = \exp(\tau_{10} \sqrt{ab});$$

$$\gamma_2 = \exp(-\tau_2 \sqrt{ab});$$

$$\gamma_1 = \exp(\tau_1 \sqrt{ab});$$

Если ниже расположенные перегораживающие сооружения (рис. 3.) имеют n водовыпусков, то уравнение (3.9) следует записать

$$Q_2 = \sum_{i=1}^n Q_{1i}; \quad N_k A_k = \sum_{i=1}^n N_{ki} A_{ki}; \quad R_k z_1 = \sum_{i=1}^n R_{ki} z_{1i}.$$

В случае, когда граничные сооружения представлены насосными станциями, выражения для граничных условий имеют вид [59]

$$N_n A_n + R_n z_2 = \frac{\Delta Q_2}{Q_2} \quad (3.10)$$

$$N_{ki} A_{ki} + R_{ki} z_{1i} = \frac{\Delta Q_1}{Q_1} \quad (3.11)$$

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (3.12)$$

где Q_2 , ΔQ_2 — расход и изменение расхода насосной станции в начале канала;

ΔQ_i — изменение расхода i -ой насосной станции, расположенной в конце участка на i -ом отводе.

Разработанный метод преобразования уравнений (3.7) и (3.8) дает возможность аналитически выразить все основные свойства распределенных процессов в открытых каналах, такие, как передача волновых расходов, изменение инерционности процессов и затухание волн вдоль канала, наличие чистого запаздывания и т. д.

В последние годы развитие и применение электронно-вычислительных машин открыли большие перспективы для гидравлики при расчете неустановившегося движения воды в открытых руслах и каналах.

В работе [58] приводится имитационная математическая модель, описывающая переходные процессы в открытой оросительной системе. Эта модель позволяет, зная начальное состояние системы, морфометрические и гидравлические характеристики оросительных каналов, характеристики входящих в систему водохозяйственных сооружений, а также возмущения, действующие в отдельных узлах этой системы в виде заданных водозаборов, либо управляющих воздействий, предсказать распределение расходов и ординат свободной поверхности, а также параметров, описывающих работу водохозяйственных сооружений, в любой следующий за начальным момент времени. В частности, эта модель позволяет следующее:

- выяснить реакцию системы на аварийный попуск, либо на оперативное управляющее воздействие (переход системы с одного стационарного режима на другой);
- получить картину установившегося режима в системе;
- изучить влияние тех или иных параметров на характер переходного процесса в системе.

В работе разработаны алгоритмы и программа расчета переходных процессов в открытых оросительных системах на цифровой ЭВМ, а также приближенный алгоритм определения режима открытия затворов гидротехнических сооружений для реализации заданного плана водораспределения в разветвленной оросительной системе.

В [60] разработаны алгоритмы, блок-схемы и быстродействующая программа для цифровой ЭВМ расчета переходных процессов в каналах с различными схемами регулирования. Ядром программы служит алгоритм расчета переходных процессов, построенный на основе операторного уравнения Э. Э. Маковского, решенного с помощью метода графов переходных состояний.

В подводящих и отводящих каналах реальных систем машинного водоподъема строят различные по назначению и конструк-

ции регулирующие сооружения, например, гидротехнические, насосные станции или их комбинации. В зависимости от типов регулирующих сооружений на каждом участке этих каналов применяют соответствующие САР уровня воды.

При автоматизации гидротехнических сооружений открытых каналов используют, например САР уровня воды [1] верхнего бьефа, нижнего бьефа, с перетекающими объемами и др.

Большое количество насосных станций и гидротехнических сооружений затрудняет расчеты режимов их работы, переходных процессов и т. д. Поэтому систему машинного водоподъема предлагается разбить на типовые элементы, состоящие из каскадов насосных станций и гидротехнических сооружений, что существенно упростит трудности, связанные с ее исследованиями.

Любую систему машинного водоподъема можно рассматривать как цепочку типовых элементов.

1. Насосная станция — гидротехническое сооружение — насосная станция.

2. Гидротехническое сооружение — насосная станция — гидротехническое сооружение.

3. Гидротехническое сооружение — насосная станция — насосная станция.

4. Насосная станция — насосная станция — гидротехническое сооружение.

5. Насосная станция — насосная станция — насосная станция.

6. Насосная станция — гидротехническое сооружение — гидротехническое сооружение.

7. Гидротехническое сооружение — гидротехническое сооружение — насосная станция.

Наиболее характерные — первые пять, так как взято по два участка каскада — нижний и верхний бьефы насосных станций, что дает полную картину взаимосвязи насосных станций и гидротехнических сооружений в каскаде.

Рассмотрим систему машинного водоподъема как типовой элемент каскада гидротехническое сооружение — насосная станция — гидротехническое сооружение (рис. 22), который является сложной системой с распределенными параметрами.

Неустановившееся движение воды на участках подводящего ($k=1$) и отводящего ($k=2$) каналов опишем системой уравнений Сен-Венана [61]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V_k(x_k, t)}{\partial t} &= -g \frac{\partial H_k(x_k, t)}{\partial x_k} - \\ &- \frac{\partial V_k(x_k, t)}{\partial x_k} V_k(x_k, t) - g(i_k' - i_k) \\ \frac{\partial \omega_k(x_k, t)}{\partial t} &= - \frac{\partial Q_k(x_k, t)}{\partial x_k}, \quad 0 < x_k \leq l_k, \quad t > t_0, \quad k = 1, 2 \end{aligned} \right\}, \quad (3.13)$$

где $Q_k(x_k, t)$, $H_k(x_k, t)$ — расход и уровень воды в каналах;
 $\omega_k(x_k, t)$ — площадь живого сечения водного потока;

$V_k(x_k, t) = \frac{Q_k(x_k, t)}{\omega_k(x_k, t)}$ — средняя скорость потока;

i_k^f , i_k — уклон трения и дна;

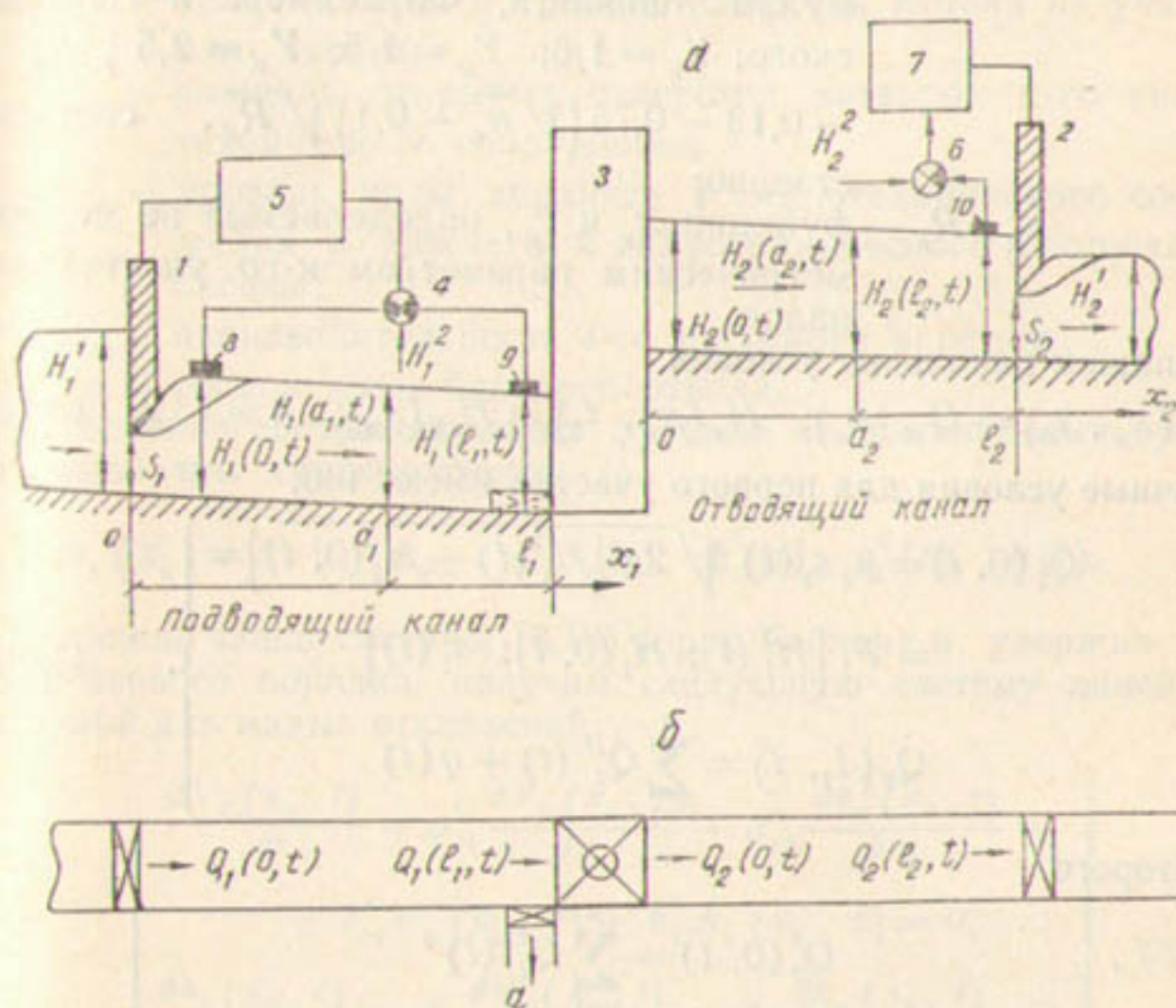


Рис. 22. Схема типового элемента каскада гидротехническое сооружение—насосная станция—гидротехническое сооружение.

1, 2—гидротехнические сооружения, 3—насосная станция, 4, 6—устройство для сравнения, 5, 7—регуляторы, 8, 9, 10—датчики.

x_k — пространственная координата вдоль оси каналов;

g — ускорение силы тяжести;

k — номер участка каналов;

t — время.

Уклон трения определяется так:

$$i_k^f = \frac{Q_k^2}{\kappa_k^2}, \quad (3.14)$$

где $k_k = \frac{\omega_k R_k^{Y_k + \frac{1}{2}}}{n_k}$ — модуль расхода;

$R_k = \omega_k / \lambda_k$ — гидравлический радиус потока;

λ_k — смоченный периметр;

n_k — коэффициент шероховатости;

Y_k — число определяемое по эмпирическим формулам Маннинга, Форхеймера и Павловского: $Y_k = 1/6$; $Y_k = 1/5$; $Y_k = 2,5 \sqrt{n_k} - 0,13 - 0,75 (\sqrt{n_k} - 0,1) \sqrt{R_k}$, соответственно;

ω_k, R_k — функции x_k и t_k , определяемые по морфометрическим параметрам k -го участка каналов.

Запишем начальные условия

$$Q_k = (x_k, t_0) = Q_{k0}(x_k); \quad H_k(x_k, t_0) = H_{k0}(x_k); \quad k = 1, 2. \quad (3.15)$$

Граничные условия для первого участка имеют вид

$$\left. \begin{aligned} Q_1(0, t) &= \mu_1 s_1(t) \sqrt{2g [H_1^1(t) - H_1(0, t)]} = \\ &= F_1 [H_1^1(t); H_1(0, t); s_1(t)] \\ Q_1(l_1, t) &= \sum_{i=1}^k Q_i^H(t) + q(t) \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

Для второго

$$\left. \begin{aligned} Q_2(0, t) &= \sum_{i=1}^k Q_i^H(t) \\ Q_2(l_2, t) &= \mu_2 s_2(t) \sqrt{2g [H_2(l_2, t) - H_2^1(t)]} = \\ &= F_2 [H_2(l_2, t); H_2^1(t); s_2(t)]. \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

где μ_1, μ_2 — коэффициенты расхода 1 и 2 гидротехнических сооружений;

$s_1(t), s_2(t)$ — площади открытия отверстий затворов 1 и 2 гидротехнических сооружений;

$H_1^1(t), H_2^1(t)$ — уровень воды верхнего 1 гидротехнического сооружения и нижнего 2 гидротехнического сооружения бьефов;

$Q_i^H(t)$ — производительность i -го насосного агрегата;

n — количество работающих насосных агрегатов;

$q(t)$ — расход воды бокового отвода, расположенного в конце первого участка (рис. 22, б).

Для решения задач регулирования большое значение имеют динамические характеристики объектов при относительно малых отклонениях от некоторых начальных режимов их работы.

Пусть начальное установившееся движение водного потока на участках каналов равномерное. Гидравлические параметры потока, соответствующие такому движению, обозначим:

$H_{к0}, V_{к0}$ — уровень воды и средняя скорость потока на участке k -го канала;

$s_{к0}$ — площадь открытых отверстий затворов k -го гидротехнического сооружения;

H_{10}^1, H_{20}^1 — уровень воды верхнего 1 гидротехнического сооружения и нижнего 2 гидротехнического сооружения бьефов;

Q_i^n — производительность i -го насосного агрегата;

q_0 — расход воды бокового отвода.

Отклонение соответствующих функций от номинальных значений обозначим соответственно

$$h_k(x_k, t); V_k(x_k, t); s_k(t); h_k^1(t); q_i^n(t), q(t).$$

Разложив члены системы (3.13) в ряд Тейлора и удержав члены первого порядка, получим следующую систему линейных уравнений для малых отклонений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V_k(x_k, t)}{\partial t} + a_{11}^k \frac{\partial V_k(x_k, t)}{\partial x_k} + a_{12}^k \frac{\partial h_k(x_k, t)}{\partial x_k} + \\ + b_{11}^k V_k(x_k, t) + b_{12}^k h_k(x_k, t) = 0, \\ \frac{\partial h_k(x_k, t)}{\partial t} + a_{21}^k \frac{\partial V_k(x_k, t)}{\partial x_k} + a_{22}^k \frac{\partial h_k(x_k, t)}{\partial x_k} = 0 \\ 0 < x_k < l, t > t_0 \end{aligned} \right\}, \quad (3.18)$$

где

$$a_{11}^k = V_{к0}; \quad a_{12}^k = g; \quad a_{21}^k = H_{к0}; \quad a_{22}^k = V_{к0};$$

$$b_{11}^k = g \frac{\partial i_k^f}{\partial V_k} (V_{к0}, H_{к0}); \quad b_{12}^k = g \frac{\partial i_k^f}{\partial H_k} (V_{к0}, H_{к0}); \quad k = 1, 2.$$

Аналогично граничные условия (3.16)...(3.17) приведем к линейным уравнениям. При этом учитываем, что коэффициенты расхода гидротехнических сооружений μ_1, μ_2 являются функциями уровней воды верхнего и нижнего бьефов насосной станции.

Для первого участка каналов получим

$$\left. \begin{aligned} V_1(0, t) + \kappa_{10}^1 h_1(0, t) &= \kappa_{20}^1 s_1(t) + \kappa_{30}^1 h_1^1(t), \\ V_1(l, t) + \kappa_{1l}^1 h_1(l, t) &= \kappa_{1l}^1 [q(t) + f_1(t)] \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

Для второго

$$\left. \begin{aligned} V_2(0, t) + \kappa_{10}^2 h_1(0, t) &= \kappa_{20}^2 f_1(t), \\ V_2(l_2, t) + \kappa_{1l}^2 h_2(l, t) &= \kappa_{2l}^2 [s_2(t) + \kappa_{3l}^2 h_2(t)] \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

где

$$\kappa_{10}^1 = \frac{\partial F_1}{\partial H_1}(H_{10}^1, H_{10}, s_{10}); \quad \kappa_{1l}^2 = \frac{\partial F_2}{\partial H_2}(H_{20}^1, H_{20}, s_{20});$$

$$\kappa_{20}^1 = \frac{\partial F_1}{\partial s_1}(H_{10}^1, H_{10}, s_{10}); \quad \kappa_{2l}^2 = \frac{\partial F_2}{\partial s_2}(H_{20}^1, H_{20}, s_{20});$$

$$\kappa_{30}^1 = \frac{\partial F_1}{\partial H_1^1}(H_{10}^1, H_{10}, s_{10}); \quad \kappa_{3l}^2 = \frac{\partial F_2}{\partial H_2^1}(H_{20}^1, H_{20}, s_{20});$$

$$\kappa_{1l}^1 = \frac{V_{10}}{\omega_{10}};$$

$$\kappa_{10}^2 = \frac{V_{20}}{\omega_{20}};$$

$$\kappa_{2l}^1 = \frac{1}{\omega_{10}};$$

$$\kappa_{20}^2 = \frac{1}{\omega_{20}};$$

ω_{10}, ω_{20} — живое сечение водного потока первого и второго участков каналов, соответствующее начальному равномерному режиму;

$f_1(t)$ — отклонение производительности насосной станции при изменении угла разворота лопастей осевого насоса или количества работающих насосных агрегатов.

Начальные условия для отклонений запишем в виде

$$V_k(x_k, t_0) = V_{k0}(x_k), \quad h_k(x_k, t_0) = h_{k0}(x) \quad (3.21)$$

Связь между изображениями Лапласа входного и выходного сигналов распределенного блока выразим символически [62].

$$Q^1(x_1, p) = W^1(x_1, \xi_1, p) \oplus \bar{W}^1(x_1, p), \quad (3.22)$$

где $\bar{W}^1(x_1, p)$, $Q(x_1, p)$ — преобразование Лапласа входного и выходного сигналов;

$W^1(x_1, \xi_1, p)$ — передаточная матрица распределенного блока $0 \leq x_1, \xi_1 \leq l_1$;

$\oplus$ — символ, означающий интегрирование двух связываемых этим символом функций по области, которой принадлежат две внутренние переменные.

Рассмотрим принцип работы САР уровней воды (рис. 22) и представим их в виде структурной схемы. Системы работают следующим образом. Сигналы $h_1(0, t)$ и $h_1(l_1, t)$, измеренные с помощью датчиков уровней воды 8 и 9 соответственно, суммируются и поступают в устройство 4, где сравниваются с заданным значением уровня воды $h_1^2(t)$, а сигнал $h_2(l_2, t)$, измеренный с помощью датчика 10, поступает в устройство 6, где сравнивается с сигналом $h_2^2(t)$. Сигнал рассогласования $[h_1(0, t) + h_1(l_1, t)] - h_1^2(t)$ преобразуется по закону регулирования регулятора 5 и воздействует на величину открытия затвора 1 гидротехнического сооружения $s_1(t)$, а сигнал рассогласования $h_2(l_2, t) - h_2^2(t)$ преобразуется по закону регулирования регулятора 7 и воздействует на величину открытия затвора 2 гидротехнического сооружения $s_2(t)$.

Связь между изображением Лапласа сигналов $s_1(t)$ и $[h_1(0, t) + h_1(l_1, t)] - h_1^2(t)$, $s_2(t)$ и $h_2(l_2, t) - h_2^2(t)$ запишем в виде

$$\begin{aligned} \bar{s}_1(p) &= W_1(p) \{ [\bar{h}_1(0, p) + \bar{h}_1(l_1, p)] - \bar{h}_1^2(p) \} = \\ &= W_1(p) \{ \bar{h}_1(x_1, p) \oplus [\delta(\xi_1) + \delta(\xi_1 - l_1)] - \bar{h}_1^2(p) \}, \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \bar{s}_2(p) &= W_2(p) [\bar{h}_2(l_2, p) - h_2^2(p)] = \\ &= W_2(p) [\bar{h}_2(x_2, p) \oplus \delta(\xi_2 - l_2) - h_2^2(p)], \end{aligned} \quad (3.24)$$

где $W_1(p) = K_1$; $W_2(p) = K_2$ — передаточные функции регуляторов 5 и 7 пропорционального действия;

$\delta(\xi_i - l_i)$ — дельта-функция.

На рис. 23 приведена структурная схема САР уровней воды типового каскада гидротехническое сооружение — насосная станция — гидротехническое сооружение, где учтены все изложенные рассуждения.

Обозначения в структурной схеме следующие [62]:

$$D_1^1 = \frac{(a_{12}^1 a_{21}^1 - a_{11}^1 a_{22}^1) \kappa_{20}^1}{a_{22}^1 - a_{21}^1 \kappa_{20}^1}; \quad D_2^1 = \frac{(a_{11}^1 a_{22}^1 - a_{21}^1 a_{12}^1) \kappa_{21}^1}{a_{12}^1 - a_{11}^1 \kappa_{11}^1}; \quad (3.25)$$

$$D_1^2 = \frac{(a_{12}^2 a_{21}^2 - a_{11}^2 a_{22}^2) \kappa_{20}^2}{a_{22}^2 - a_{21}^2 \kappa_{10}^2}; \quad D_2^2 = \frac{(a_{11}^2 a_{22}^2 - a_{12}^2 a_{21}^2) \kappa_{11}^2}{a_{12}^2 - a_{11}^2 \kappa_{11}^2}. \quad (3.26)$$

Нами также разработаны математическая модель и структурная схема САУ уровней воды типового каскада насосная станция — гидротехническое сооружение — насосная станция [63].

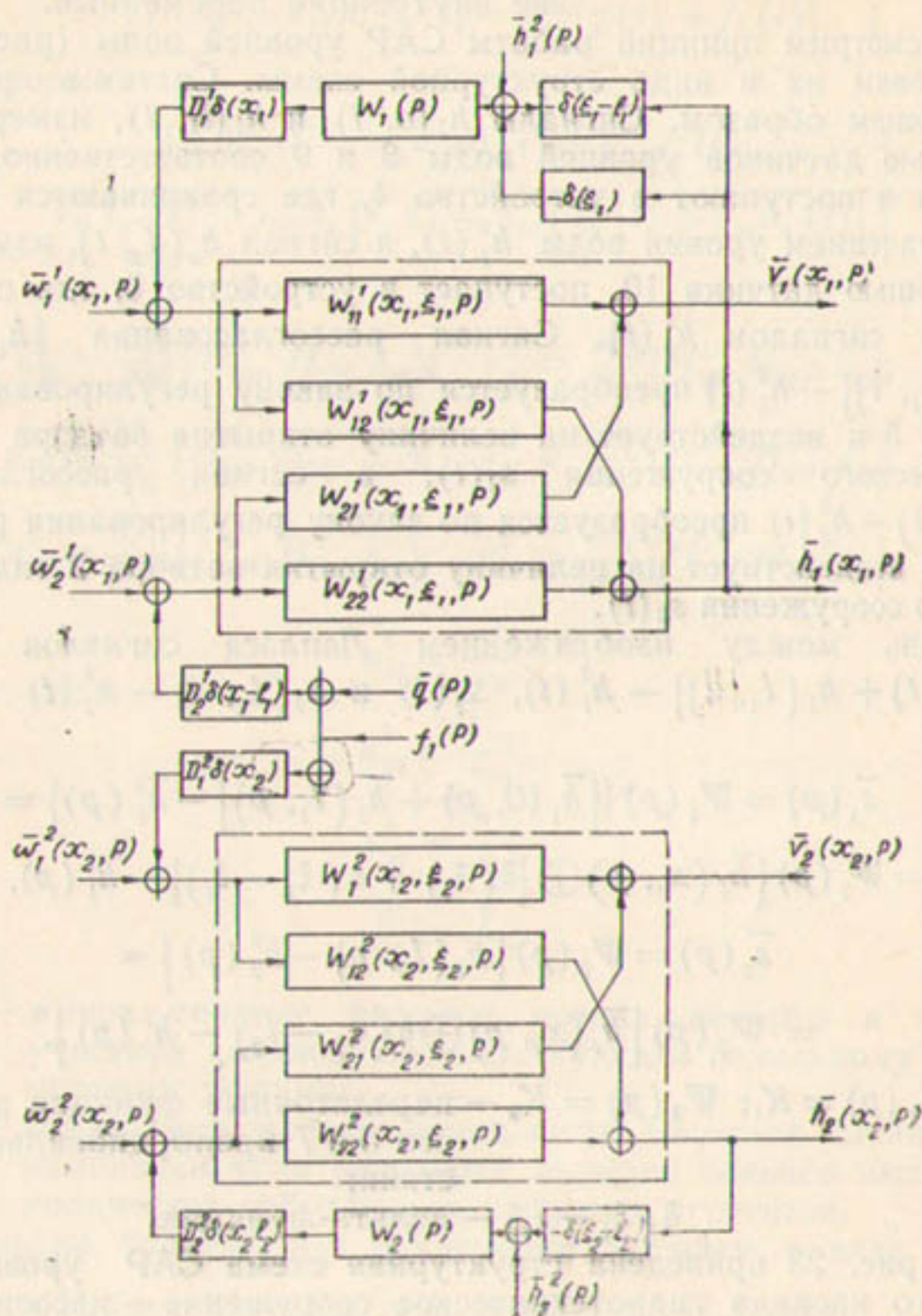


Рис. 23. Структурная схема САУ уровней воды типового элемента каскада гидротехническое сооружение—насосная станция—гидротехническое сооружение

Неустановившееся движение воды на участках отводящего ($k=1$) и подводящего ($k=2$) каналов характеризуется функциями распределения расхода $Q_k(x_k, t)$ и уровня воды $H_k(x_k, t)$, зависящими от пространственных переменных $X_k \in [0, l_k]$ и временных $t \geq t_0$, которые удовлетворяют системе уравнений Сен-Венана (3.13), здесь l_k — длина k -го участка.

Начальные условия для функции распределения расхода и уровня воды на участках соответствуют (3.15).

Граничные условия для первого участка имеют вид

$$\left. \begin{aligned} Q_1(0, t) &= \sum_{i=1}^n Q_i^{n1}(t), \\ Q_1(l_1, t) &= \mu s(t) \sqrt{2g[H_1(l_1, t) - H_2(0, t)]} + q_1(t) \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

Для второго участка

$$\left. \begin{aligned} Q_2(0, t) &= \mu s(t) \sqrt{2g[H_1(l_1, t) - H_2(0, t)]}, \\ Q_2(l_2, t) &= \sum_{i=1}^n Q_i^{n2}(t) + q_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

где μ — коэффициент расхода гидротехнического сооружения;

$s_1(t)$ — площадь открытия отверстия затворов гидротехнического сооружения;

$Q_i^{n1}(t)$, $Q_i^{n2}(t)$ — производительности i -го насосного агрегата 1 и 2 насосных станций;

$H_1(l_1, t)$ — уровень воды в конце первого участка;

$H_2(0, t)$ — уровень воды в начале второго участка;

$q_k(t)$ — расход воды бокового отвода, расположенного в конце k -го участка.

Линеаризованная система дифференциальных уравнений в частных производных относительно малых отклонений уровня воды $h_k(x_k, t)$ и средней скорости $v_k(x_k, t)$ от начального установившегося движения водного потока соответствует (3.18).

Граничные условия (3.27), (3.28) приведем к линейным уравнениям. При этом учитываем, что коэффициент расхода гидротехнического сооружения μ зависит от уровней воды в верхнем и нижнем бьефах сооружения.

Для первого участка канала получим:

$$\left. \begin{aligned} v_1(0, t) + \kappa_{10}^1 h_1(0, t) &= \kappa_{20}^1 f_1(t), \\ v_1(l_1, t) + \kappa_{1l}^1 h_1(l_1, t) &= \kappa_{2l}^1 s_1(t) + \kappa_{3l}^1 h_2(0, t) + q_1(t), \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

$$\left. \begin{aligned} v_2(0, t) + \kappa_{10}^2 h_2(0, t) &= \kappa_{20}^2 s_1(t) + \kappa_{30}^2 h_1(l_1, t), \\ v_2(l_2, t) + \kappa_{1l}^2 h_2(l_2, t) &= \kappa_{2l}^2 [f_2(t) + q_2(t)] \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

где

$$\kappa_{10}^1 = \frac{V_{10}}{\omega_{10}}, \quad \kappa_{20}^1 = \frac{1}{\omega_{10}},$$

$$K_{1l}^2 = \frac{V_{20}}{\omega_{20}}, \quad K_{2l}^2 = \frac{1}{\omega_{20}},$$

$$K_{1l}^2 = \frac{\partial F_1}{\partial H_1}(H_{10}, H_{20}, s_{10}), \quad K_{2l}^1 = \frac{\partial F_1}{\partial s}(H_{10}, H_{20}, s_{10}),$$

$$K_{3l}^1 = \frac{\partial F_1}{\partial H_2}(H_{10}, H_{20}, s_{10}), \quad K_{10}^2 = \frac{\partial F_2}{\partial H_1}(H_{10}, H_{20}, s_{10}),$$

$$K_{20}^2 = \frac{\partial F_2}{\partial s}(H_{10}, H_{20}, s_{10}), \quad K_{30}^2 = \frac{\partial F_2}{\partial H_2}(H_{10}, H_{20}, s_{10}),$$

$$F_1[H_1(l_1, t), H_2(0, t), s_1(t)] = \frac{\mu s_1(t) \sqrt{2g} [H_1(l_1, t) - H_2(0, t) + q(t)]}{\omega_1(l_1, t)},$$

$$F_2[H_1(l_1, t), H_2(0, t), s_1(t)] = \frac{\mu s_1(t) \sqrt{2g} [H_1(l_1, t) - H_2(0, t)]}{\omega_2(0, t)}.$$

Здесь гидравлические параметры водных потоков на участках канала, соответствующие начальным установившимся равномерным движениям, обозначены так: H_{k0} и V_{k0} — уровень воды и средняя скорость потока на участке k -го канала; s_{10} — площадь, открытых отверстий затворов гидротехнического сооружения; H_{10}^1 и H_{20}^1 — уровень воды в нижнем 1 насосной станции и верхнем 2 насосной станции бьефах; Q_{i0}^{kn} — производительность i -го насосного агрегата k -ой насосной станции; q_{k0} — расход воды бокового отвода на участке k -го канала; ω_{k0} — живое сечение водного потока участков k -го канала, соответствующее начальному равномерному режиму.

Отклонения соответствующих функций от приведенных начальных режимов обозначены $h_k(x_k, t)$, $v(x_k, t)$, $s_1(t)$, $h_1^1(t)$, $h_2^1(t)$, $f_k(t)$, $q_k(t)$.

Отклонения производительности f_k возникают за счет изменения количества работающих насосных агрегатов k -ой насосной станции.

Начальные условия для отклонения запишем в виде (3.21) и связь между изображениями Лапласа входного и выходного сигналов распределенного блока выразим как (3.22).

Система автоматического регулирования уровней воды (рис. 24) работает следующим образом: сигналы $h_2(0, t)$ и $h_2(l_2, t)$, измеренные с помощью датчиков уровней воды 6 и 7 соответственно, суммируются с помощью устройства 9, выходной сигнал которого вместе с сигналами $h_1(l, t)$ и $h_3(t)$, измеренных с помощью датчика уровня воды 5 и заданного значения уровня воды соответственно, поступают на вход устройства 8, где на выходе получается сигнал рассогласования

$$\Delta h(t) = (K_1 h_1(l_1, t) + h_3(t)) - (K_2 h_2(0, t) + K_3 h_2(l_2, t)), \quad (3.31)$$

здесь K_1 , K_2 и K_3 — чувствительности датчиков уровней воды 5, 6 и 7.

Далее сигнал рассогласования $\Delta h(t)$ преобразуется по закону регулирования регулятора 5 и воздействует на величину открытия затвора гидротехнического сооружения $s_1(t)$.

На рис. 25 приведена структурная схема САУ уровней воды типового элемента каскада насосная станция — гидротехническое

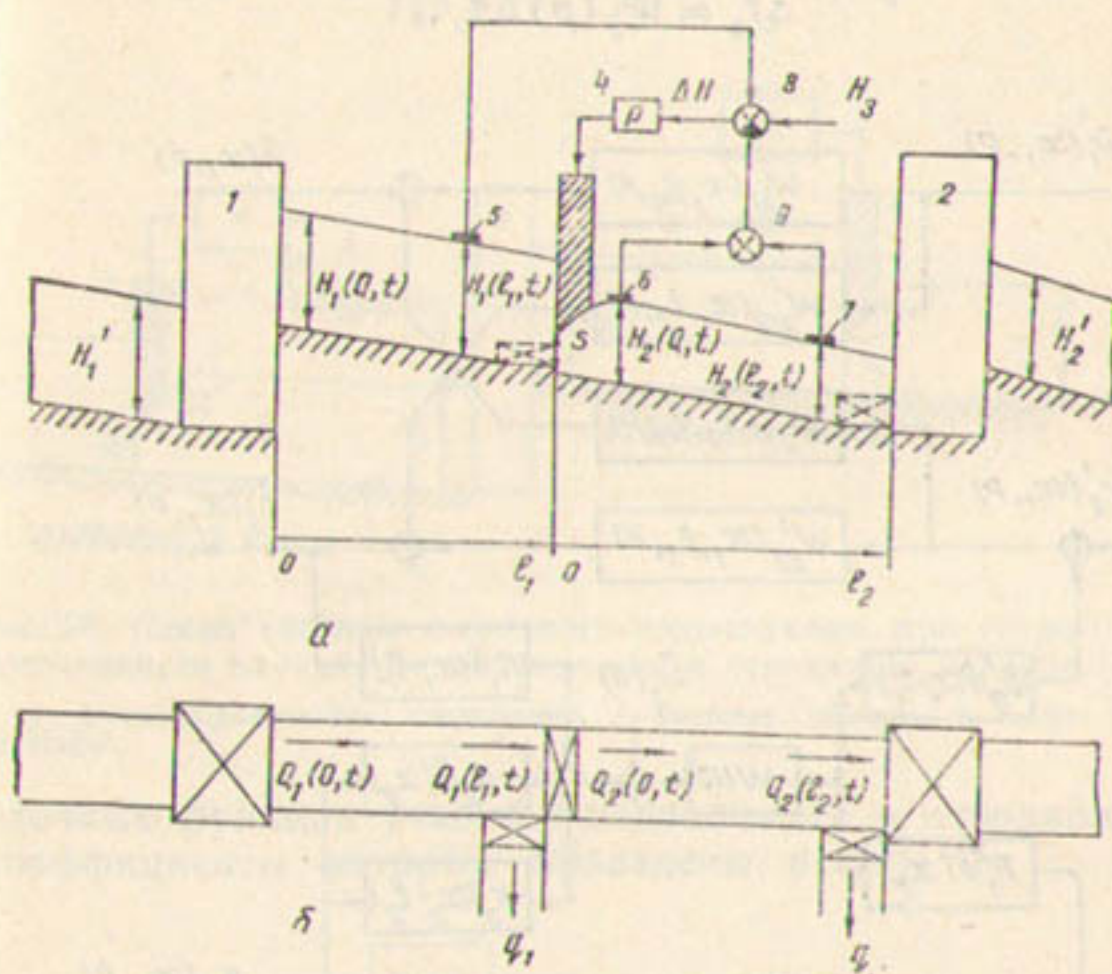


Рис. 24. Схема типового элемента каскада насосная станция — гидротехническое сооружение — насосная станция

1, 2 — станции, 3 — гидротехническое сооружение, 4 — регулятор, 5, 6, 7 — датчики, 8 — устройство сравнения, 9 — сумматор.

сооружение — насосная станция. Обозначения в структурной схеме D_1^2 и D_2^1 соответствуют (3.25) и (3.26).

При рассмотрении подводящего и отводящего каналов в системе машинного водоподъема их можно рассматривать как объекты с сосредоточенными параметрами, так как нас интересуют уровни воды и переходные процессы в определенном месте — в нижнем и верхнем бьефах насосной станции.

Согласно рис. 26 отклонение уровня воды в нижнем бьефе насосной станции имеет вид

$$\Delta h_1 = W_1^1(p) \Delta p_1 + W_2^1(p) \Delta q, \quad (3.32)$$

$$\Delta p_1 = \Delta a_1 + \Delta f_1, \quad (3.33)$$

$$\Delta f_1 = W_1(p) \Delta h_1. \quad (3.34)$$

Отклонения уровня воды в верхнем бьефе насосной станции определяется по формуле

$$\Delta h_2 = W_1^2(p) \Delta q + W_2^2(p) \Delta p_2, \quad (3.35)$$

$$\Delta p_2 = \Delta a_2 + \Delta f_2, \quad (3.36)$$

$$\Delta f_2 = W_2(p) \Delta h_2, \quad (3.37)$$

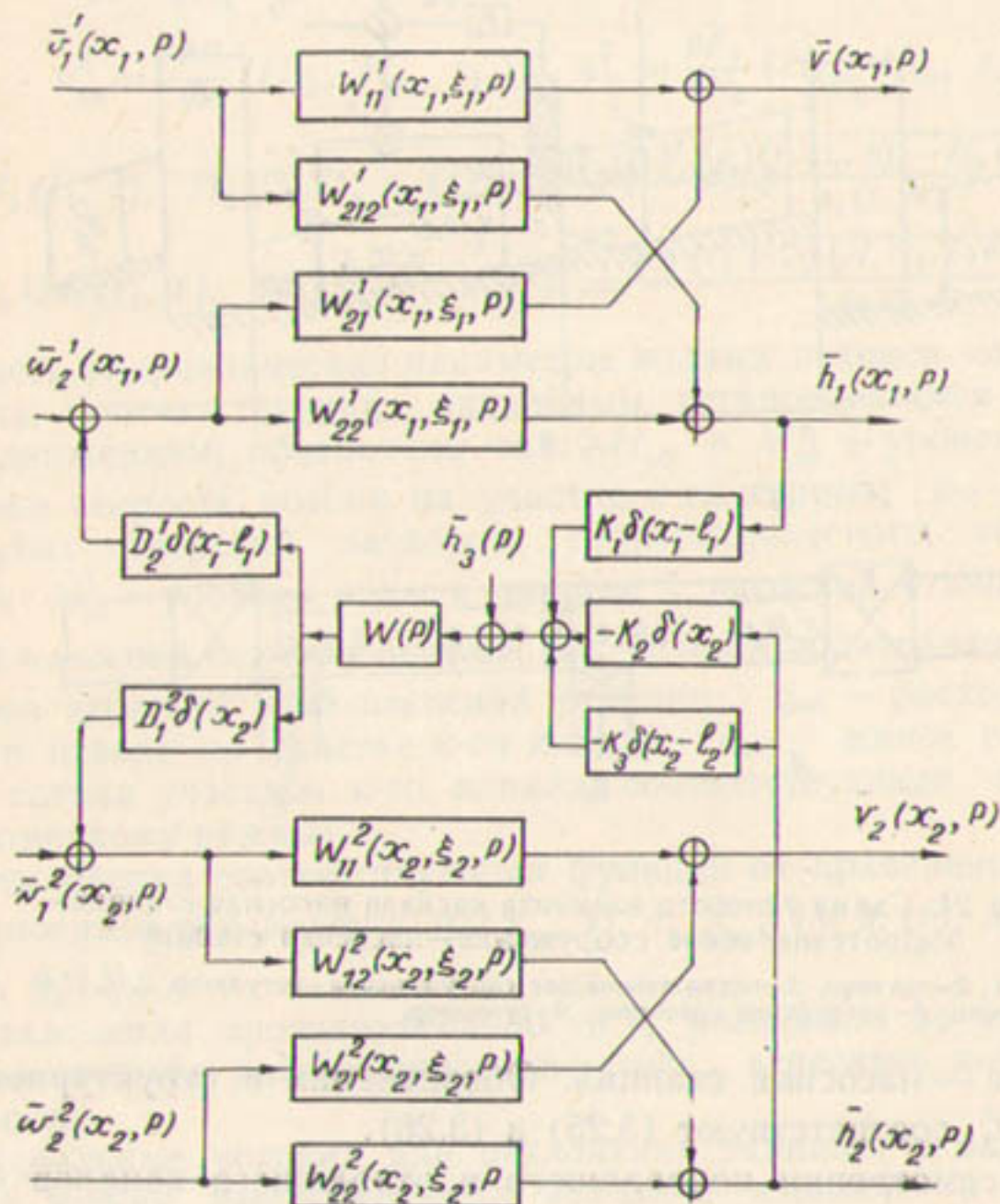


Рис. 25. Структурная схема САР уровней воды типового элемента каскада насосная станция—гидротехническое сооружение—насосная станция.

где

$$W_1^1(p) = - \frac{L_1^1 p + K_1^1}{T_1^1 p + 1} \cdot \frac{\gamma_1^1}{x_2^1} e^{-\tau_1^1 p} \cdot N_{\#}^1;$$

$$W_1^2(p) = - \frac{L_4^1 p + K_4^1}{T_4^1 p + 1} \cdot \frac{\gamma_2^1}{x_1^1} \cdot N_{\#}^1;$$

$$W_1^2(p) = - \frac{L_1^2 p + K_1^2}{T_1^2 p + 1} \cdot \frac{\gamma_1^2}{x_2^2} \cdot N_n^2;$$

$$W_2^2(p) = - \frac{L_4^2 p + K_4^2}{T_4^2 p + 1} \cdot \frac{\gamma_2^2}{x_1^2} \cdot e^{-\tau_2^{10} p} \cdot N_k^2 -$$

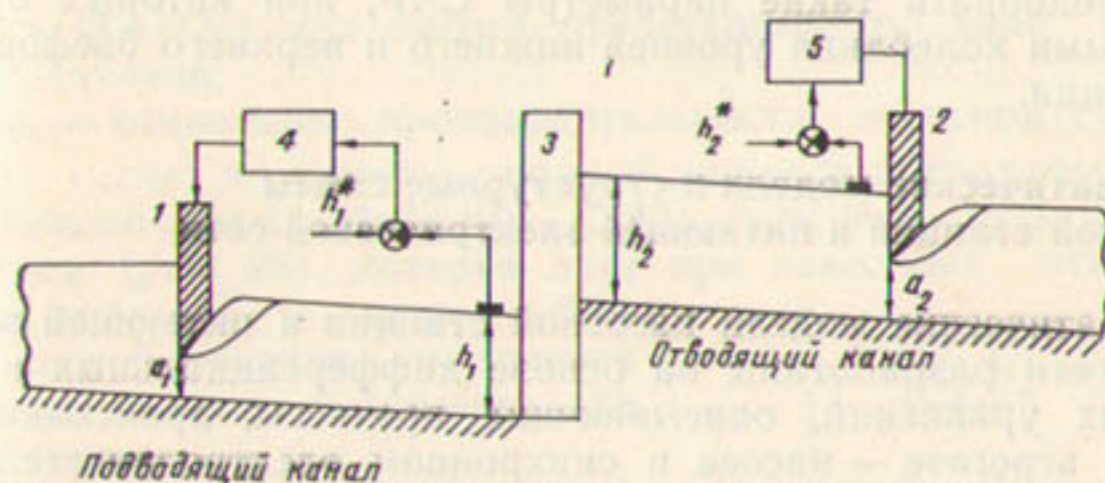


Рис. 26. Схема системы машинного водоподъема при сосредоточенности параметров подводящих и отводящих каналов.

1, 2—гидротехнические сооружения, 3—насосная станция, 4, 5—регуляторы.

— передаточные функции участков подводящего и отводящего каналов, коэффициенты которых приведены в [1];

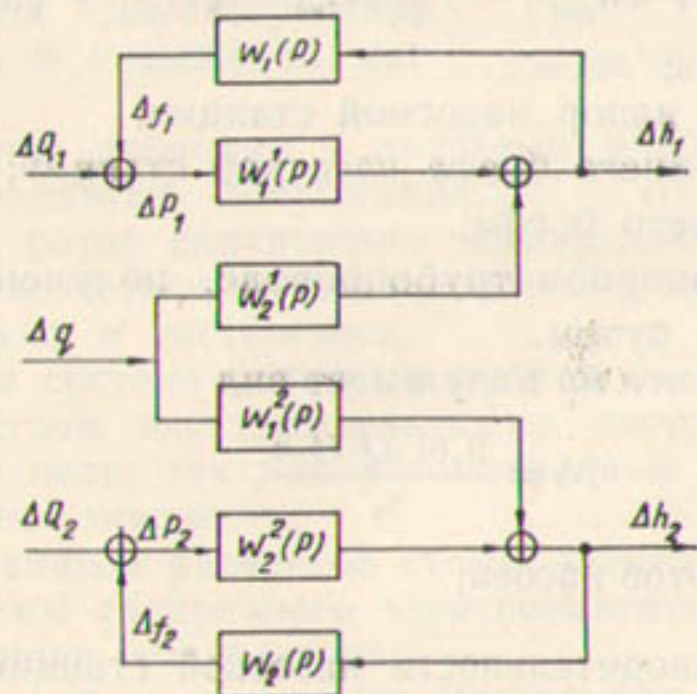


Рис. 27. Структурная схема САУ бьефов насосной станции.

$W_1(p)$, $W_2(p)$ — передаточные функции регуляторов уровня;
 Δa_1 , Δa_2 — отклонение открытия затворов 1 и 2 гидротехнических сооружений;

$\Delta f_1, \Delta f_2$ — то же под действием регуляторов 4 и 5;
 $\Delta p_1, \Delta p_2$ — результирующее отклонение открытия затворов 1 и 2 гидротехнических сооружений;
 Δg — отклонение расхода в каналах.

На основе уравнений (3.32) — (3.37) построена структурная схема САР бьефов насосной станции (рис. 27), что дает возможность подобрать такие параметры САР, при которых будут минимальными колебания уровней нижнего и верхнего бьефов насосной станции.

Математические модели и структурные схемы насосной станции и питающей электрической сети

Математические модели насосной станции и питающей электрической сети разработаны на основе дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих процессы, происходящие в насосном агрегате — насосе и синхронном электродвигателе, а также в питающей электрической сети. Однако в настоящее время такой модели насосной станции не имеется. Некоторая попытка в этом направлении сделана в работе [48].

Изменение уровней нижнего и верхнего бьефов насосной станции влияет на производительность и момент на валу насоса.

Известно, что производительность насоса находится в следующей зависимости от напора насосной станции.

$$Q = f(H) = f(H_{\text{ст}} + \Delta h_{\text{пот}}) = f[(\nabla H_{\text{вб}} - \nabla H_{\text{нб}}) + \nabla h_{\text{пот}}], \quad (3.38)$$

где H — напор насоса;

$H_{\text{ст}}$ — статический напор насосной станции;

$\nabla H_{\text{вб}}$ — отметка верхнего бьефа насосной станции;

$\nabla H_{\text{нб}}$ — то же нижнего бьефа;

$\Delta h_{\text{пот}}$ — потери в напорном трубопроводе, полученные экспериментальным путем.

Зависимость момента на валу имеет вид

$$M = \frac{9,81 \cdot Q \cdot H \cdot n}{\eta_{\text{н}}}, \quad (3.39)$$

n — число оборотов насоса;

$\eta_{\text{н}}$ — кпд насоса.

Отклонение производительности насосной станции за счет изменения уровня воды в нижнем и верхнем бьефах равняется

$$\Delta q_1 = W_{\text{н3}}(p) \Delta h_1, \quad (3.40)$$

$$\Delta q_2 = W_{\text{н4}}(p) \Delta h_2, \quad (3.41)$$

соответственно, отклонение момента нагрузки на валу насоса

$$\Delta M = W_{\text{н1}}(p) \Delta h_1 + W_{\text{н2}}(p) \Delta h_2, \quad (3.42)$$

$$W_{n1}(p) = \frac{\partial M}{\partial \Delta h_1}; \quad W_{n2}(p) = \frac{\partial M}{\partial \Delta h_2};$$

$$W_{n3}(p) = \frac{\partial [Q=f(H)]}{\partial \Delta h_1}; \quad W_{n4}(p) = \frac{\partial [Q=f(H)]}{\partial \Delta h_2};$$

функция $Q=f(H)$ для насоса представлена в виде полинома третьей степени;

$\Delta q_1, \Delta q_2$ — отклонение производительности насосной станции за счет изменения уровней нижнего и верхнего бьефов.

На основе уравнений (3.40) — (3.42) построена структурная схема насоса (рис. 28), которая дает при известных отклонениях уровней верхнего и нижнего бьефов насосной станции отклонения производительности и момента на валу насоса.

Математическое моделирование электромагнитных переходных процессов синхронного электродвигателя связано с рядом трудностей, обусловленных сложностью протекающих электромагнитных процессов, влиянием токов Фуко, гистерезиса и наличием нелинейности от моментно-угловой характеристики, реакции якоря и насыщения магнитной системы.

Моделирование проводим в линейном приближении при следующих общепринятых допущениях:

1. Статор и ротор синхронного электродвигателя собраны из тонких листов качественной стали, поэтому пренебрегаем влиянием токов Фуко и гистерезиса.

2. Магнитная система электродвигателя не насыщена.

3. Пренебрегаем электромагнитными переходными процессами в статорной цепи, так как рассматриваем электродвигатели средней и большой мощности.

Согласно принятой расчетной схемы электроснабжения и векторной диаграммы синхронного электродвигателя (рис. 29), принимаем следующие обозначения:

$x_{d\Sigma} = x_{dg} + x_c$ — суммарное синхронное реактивное сопротивление электродвигателя и питающей

$x_{q\Sigma} = x_{qg} + x_c$ — электрической сети по продольной и поперечной осям, о. е.;

$x_c = x_{\text{тр}} + x_c$ — суммарное реактивное сопротивление понижающего трансформатора и высоковольтной линии электропередачи, о. е.;

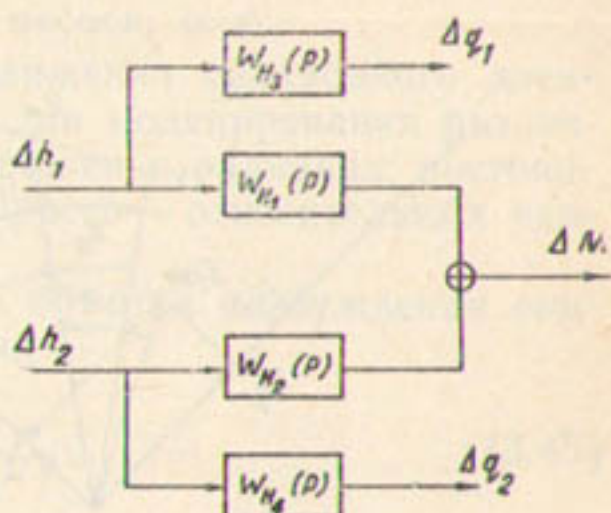


Рис. 28. Структурная схема насоса

$x'_{d\Sigma} = x'_{dg} + x_c$ — суммарное переходное реактивное сопротивление электродвигателя и питающей электрической сети по продольной оси, о. е.;

$\theta_\Sigma = \theta_g + \theta_A$, θ_g , θ_A — углы соответственно между векторами E_d и U ; E_d и $U_{ш}$; $U_{ш}$ и U из векторной диаграммы электродвигателя, рад.

При вышепринятых допущениях исходные уравнения для элементов регулируемой системы следующие.

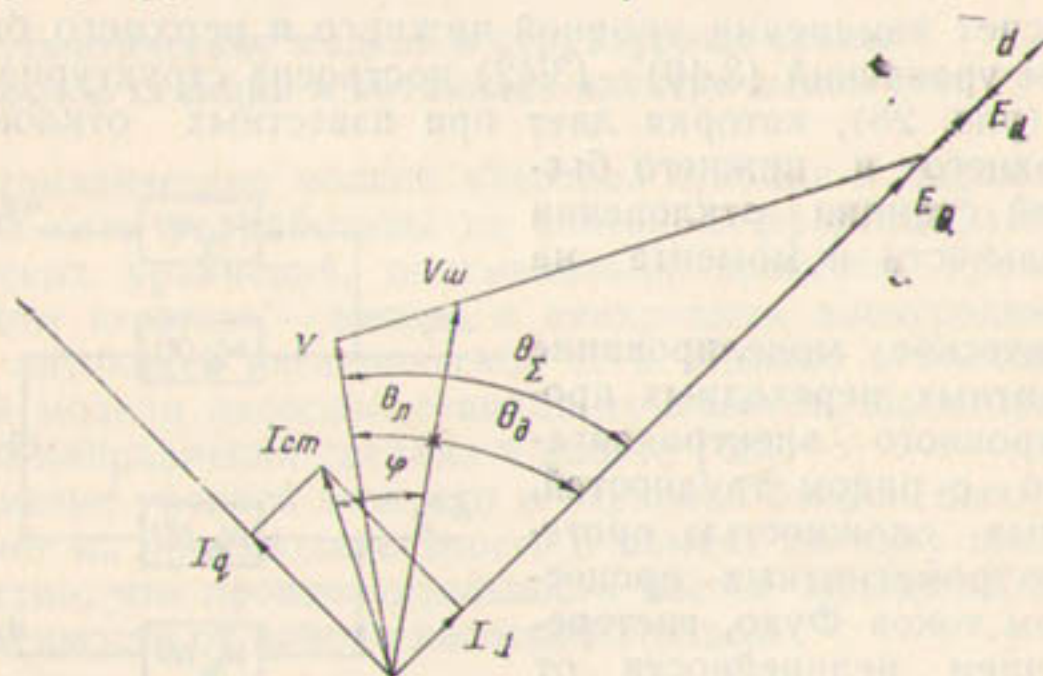


Рис. 29. Векторная диаграмма синхронного электродвигателя насосного агрегата с учетом схемы электроснабжения.

Уравнение движения синхронного электродвигателя

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_g - M_n, \quad (3.43)$$

где I — момент инерции электродвигателя, $\text{м}^2 \cdot \text{кг}$.

Представим уравнение движения в другом виде

$$\frac{T_J}{\omega_0} \frac{d\theta^2}{dt^2} = P_{g\Sigma} - P_n, \quad (3.44)$$

где $T_J = 2 \left(\frac{I \omega_0^2}{2} \right)$ — постоянная инерции синхронного электродвигателя;

$\omega_0 = 2\pi f = 3,14 \text{ с}^{-1}$ — синхронная скорость вращения ротора электродвигателя;

$P_{g\Sigma} = P_g + P_{ac}$ — суммарная электромагнитная мощность электродвигателя относительно шин постоянного напряжения, о. е.;

$$P_g = \frac{UE_d}{x_{d\Sigma}} \sin \theta_\Sigma + \frac{U_\Sigma^2}{2} \left(\frac{1}{x_{q\Sigma}} - \frac{1}{x_{d\Sigma}} \right) \sin 2\theta_\Sigma -$$

— синхронная электромагнитная мощность синхронного электродвигателя относительно шин постоянного напряжения, о. е.;

E_d — ЭДС электродвигателя в переходном режиме, о. е.;

$P_{ac} = \Lambda s$ — асинхронная электромагнитная мощность синхронного электродвигателя относительно шин постоянного напряжения, о. е.;

$\Lambda = \frac{M_{hx}}{s_{hx}}$ — коэффициент асинхронного момента;

s — скольжение;

P_n — мощность сопротивления насоса, о. е.

Такая форма записи уравнения движения синхронного электродвигателя наиболее целесообразна для моделирования различных режимов его работы, где угол выражен в радианах, постоянная инерции и время — секундах, мощность — относительных единицах [49].

Уравнение переходного процесса в обмотке возбуждения синхронного электродвигателя имеет вид

$$T_{d0} \frac{dE'_d}{dt} = E_{d0} - E'_d, \quad (3.45)$$

где T_{d0} — постоянная времени обмотки возбуждения электродвигателя при разомкнутой обмотке статора, с;

$$E'_d = \frac{x'_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}} E_d + \frac{x_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma}} U \cos \theta_\Sigma -$$

— ЭДС электродвигателя за переходной реактивностью, о. е.;

$E_{d0} = k U_n$ — ЭДС электродвигателя, соответствующая напряжению возбудителя в установившемся режиме, о. е.;

k — коэффициент пропорциональности между напряжением возбуждения и ЭДС электродвигателя;

U — напряжение возбуждения, о. е.

Уравнение переходного процесса электромашиного возбудителя постоянного тока имеет вид [21].

$$T_n \frac{dU_n}{dt} = -U_n + k_n U_p, \quad (3.46)$$

где T_n — постоянная времени обмотки возбуждения возбудителя, с;

k_n — коэффициент усиления по напряжению возбудителя;

U_n — напряжение на выходе регулятора, о. е.

Закон регулирования возбуждения, задаваемый системой АРВ, выражается уравнением

$$U_p = k_\varphi \cdot \varphi, \quad (3.47)$$

где k_φ — коэффициент усиления регулятора,

φ — угол фазы между током статора синхронного электродвигателя и напряжением сети.

Уравнения питающей электрической сети имеют следующий вид

$$\left. \begin{aligned} P'_{\Sigma} &= P_a, \\ Q_a &= Q_a, \end{aligned} \right\} \quad (3.48)$$

где $P'_{\Sigma} = P'_a + P'_{ac}$ — суммарная электромагнитная мощность синхронного электродвигателя относительно шин насосной станции, о. е.;

$$P_a^1 = \frac{U_m E_d}{x_{d\Delta}} \sin \theta_a + \frac{U_m^2}{2} \left(\frac{1}{x_{q\Delta}} - \frac{1}{x_{d\Delta}} \right) \sin 2\theta_a -$$

— синхронная электромагнитная мощность электродвигателя относительно шин насосной станции, о. е.;

$P'_{ac} = As$ — асинхронная электромагнитная мощность электродвигателя относительно шин насосной станции, о. е.;

$P_a = \frac{U_m U}{x_c} \sin \theta_a$ — активная мощность, поступающая по линии электропередачи к синхронным электродвигателям, о. е.;

$Q_a = \frac{U_m E_d}{x_{d\Delta}} \cos \theta_a - \frac{U_m^2}{x_{d\Delta}}$ — реактивная мощность синхронного электродвигателя относительно шин насосной станции, о. е.;

$Q_a = \frac{U_m^2}{x_c} - \frac{U_m U}{x_c} \cos \theta_a$ — реактивная мощность, передаваемая по линии электропередачи, о. е.

Моделирование совместных режимов работы насосной станции и питающей электрической сети проводится при малых отклонениях переменных ($\Delta\theta_\Sigma$, ΔE_d , ΔU_Σ , $\Delta\theta_a$, ΔU_p , ΔU_m) и соответствует малым качаниям системы. Поэтому необходимо линеаризовать полученные дифференциальные уравнения путем разложения функций в ряд Тейлора и отбрасывания членов высших порядков малости.

Выполняя эти операции для приведенных выше уравнений, получим полную систему линеаризованных дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в насосной станции и питающей электрической сети при малых отклонениях переменных, и систему уравнений установившегося режима.

После линеаризации и замены $\frac{d}{dt}$ оператором p , получим полную систему уравнений малых колебаний

$$\left. \begin{aligned} T_J p^2 \Delta \theta_{\Sigma} + \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \Delta \theta_{\Sigma} + \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial E_d} \Delta E_d - \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \Delta \theta_{\Sigma} &= 0 \\ T_{d0} p \frac{\partial E_d'}{\partial \theta_{\Sigma}} \Delta \theta_{\Sigma} + \left(T_{d0} p \frac{\partial E_d'}{\partial E_d} + 1 \right) \Delta E_d &= 0 \\ \Delta U_{\Sigma} - \frac{K_{\Sigma} \Delta U_p}{1 + T_{\Sigma} p} &= 0 \\ \Delta U_p - K_{\varphi} \Delta \varphi &= 0 \\ \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \Delta \theta_{\Sigma} + \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial E_d} \Delta E_d + \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} \Delta U_{\Sigma} - \\ - \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \Delta \theta_{\Sigma} - \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} \Delta U_{\Sigma} &= 0 \\ \frac{\partial Q_g}{\partial \theta_g} \Delta \theta_g + \frac{\partial Q_g}{\partial E_d} \Delta E_d + \frac{\partial Q_g}{\partial U_{\Sigma}} \Delta U_{\Sigma} - \\ - \frac{\partial Q_g}{\partial \theta_g} \Delta \theta_g - \frac{\partial Q_g}{\partial U_{\Sigma}} \Delta U_{\Sigma} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.49)$$

Для решения полученной системы уравнений (3.49) необходимо равенство количества уравнений и неизвестных переменных, поэтому преобразуем некоторые уравнения системы.

Из векторной диаграммы синхронного электродвигателя (рис. 29) получим выражение тока статора

$$I_{\text{ст}} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}, \quad (3.50)$$

где I_d , I_q — составляющие тока статора по продольной и поперечной осям.

$$I_d = \frac{E_d - U \cos \theta_d}{x_{d\Delta}}, \quad (3.51)$$

$$I_q = \frac{U \sin \theta_d}{x_{q\Delta}}. \quad (3.52)$$

Приращение тока статора электродвигателя запишем таким образом:

$$\Delta I_{\text{ст}} = \frac{\partial I_{\text{ст}}}{\partial \theta_g} \Delta \theta_g + \frac{\partial I_{\text{ст}}}{\partial E_d} \Delta E_d + \frac{\partial I_{\text{ст}}}{\partial \theta_d} \Delta \theta_d - \frac{\partial I_{\text{ст}}}{\partial \theta_d} \Delta \theta_d, \quad (3.53)$$

отсюда получим

$$\Delta I_{\text{ст}} = \frac{\partial I_{\text{ст}}}{\partial \theta_{\text{д}}} \Delta \theta_{\text{д}} + \frac{\partial I_{\text{ст}}}{\partial E_{\text{д}}} \Delta E_{\text{д}} - \frac{\partial I_{\text{ст}}}{\partial \theta_{\text{л}}} \Delta \theta_{\text{л}}. \quad (3.54)$$

Используя (2.27), получим приращение тока статора в другом виде

$$\Delta I_{\text{ст}} = \frac{\partial I_{\text{ст}}}{\partial \varphi} \Delta \varphi. \quad (3.55)$$

Обозначив частную производную $\frac{\partial I_{\text{ст}}}{\partial \varphi}$ через коэффициент $K_{\text{пр}}$, получим приращение угла φ

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta I_{\text{ст}}}{K_{\text{пр}}}, \quad (3.56)$$

где

$$K_{\text{пр}} = \frac{2,5849 \cos \varphi_0}{2 \sqrt{2,59 - 2,5849 \sin \varphi_0}} - b \cos \varphi_0;$$

φ_0 — значение угла φ в заданном режиме работы синхронного электродвигателя.

Значение коэффициента $K_{\text{пр}}$ зависит от режима работы синхронного электродвигателя. Так, при режиме работы 0,9 (емк) он равен 0,43, при 0,95 (емк) соответственно 0,383; при 1,0—0,34; 0,95 (инд) — 0,4625; 0,9 (инд) — 0,7281.

Подставив в (3.56) значение приращения тока статора синхронного электродвигателя (3.54), получим выражение приращения угла φ через малые отклонения переменных $\Delta \theta_{\text{д}}$, $\Delta E_{\text{д}}$ и $\Delta \theta_{\text{л}}$.

При дополнении разработанной системы АРВ каналом на поддержание напряжения на шинах насосной станции приращение напряжения равняется

$$\Delta U_{\text{ш}} = \frac{\partial U_{\text{ш}}}{\partial \theta_{\text{д}}} \Delta \theta_{\text{д}} + \frac{\partial U_{\text{ш}}}{\partial E_{\text{д}}} \Delta E_{\text{д}} + \frac{\partial U_{\text{ш}}}{\partial \theta_{\text{л}}} \Delta \theta_{\text{л}} - \frac{\partial U_{\text{ш}}}{\partial \theta_{\text{л}}} \Delta \theta_{\text{л}}, \quad (3.57)$$

отсюда получим

$$\Delta U_{\text{ш}} = \frac{\partial U_{\text{ш}}}{\partial \theta_{\text{д}}} \Delta \theta_{\text{д}} + \frac{\partial U_{\text{ш}}}{\partial E_{\text{д}}} \Delta E_{\text{д}} - \frac{\partial U_{\text{ш}}}{\partial \theta_{\text{л}}} \Delta \theta_{\text{л}}. \quad (3.58)$$

Преобразуем уравнения питающей электрической сети. Уравнение активной мощности при малых отклонениях переменных имеет вид

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P'_{g\varphi}}{\partial \theta_g} \Delta \theta_g + \frac{\partial P'_{g\varphi}}{\partial E_g} \Delta E_g + \frac{\partial P'_{g\varphi}}{\partial U_{\text{ш}}} \Delta U_{\text{ш}} - \frac{\partial P_{\text{л}}}{\partial \theta_{\text{л}}} \Delta \theta_{\text{л}} - \\ & - \frac{\partial P_{\text{л}}}{\partial U_{\text{ш}}} \Delta U_{\text{ш}} + \frac{\partial P'_{q\varphi}}{\partial \theta_{\text{л}}} \Delta \theta_{\text{л}} - \frac{\partial P'_{q\varphi}}{\partial \theta_{\text{л}}} \Delta \theta_{\text{л}}, \end{aligned} \quad (3.59)$$

отсюда получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial P'_{q\Sigma}}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n + \frac{\partial P'_{q\Sigma}}{\partial E_d} \Delta E_d + \left(\frac{\partial P'_{q\Sigma}}{\partial U_{ш}} - \frac{\partial P_s}{\partial U_{ш}} \right) \Delta U_{ш} - \\ - \left(\frac{\partial P_s}{\partial \theta_n} + \frac{\partial P'_{q\Sigma}}{\partial \theta_n} \right) \Delta \theta_n = 0. \end{aligned} \quad (3.60)$$

Уравнение реактивной мощности

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n + \frac{\partial Q_n}{\partial E_d} \Delta E_d + \frac{\partial Q_n}{\partial U_{ш}} \Delta U_{ш} - \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n - \\ - \frac{\partial Q_n}{\partial U_{ш}} \Delta U_{ш} + \frac{\partial Q_n}{\partial Q_n} \Delta \theta_n - \frac{\partial Q_n}{\partial Q_n} \Delta \theta_n = 0, \end{aligned} \quad (3.61)$$

отсюда получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n + \frac{\partial Q_n}{\partial E_d} \Delta E_d + \left(\frac{\partial Q_n}{\partial U_{ш}} - \frac{\partial Q_n}{\partial U_{ш}} \right) \Delta U_{ш} - \\ - \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} - \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \right) \Delta \theta_n = 0. \end{aligned} \quad (3.62)$$

Таким образом, система уравнений насосной станции и питающей электрической сети имеет вид

$$\left. \begin{aligned} T_J p^2 \Delta \theta_n + \frac{\partial P_{q\Sigma}}{\partial Q_n} \Delta \theta_n + \frac{\partial P_{q\Sigma}}{\partial E_d} \Delta E_d - \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n &= 0 \\ T_{d0} p \frac{\partial E'_d}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n + \left(T_{d0} p \frac{\partial E'_d}{\partial E_d} + 1 \right) \Delta E_d - \kappa \Delta U_n &= 0 \\ \Delta U_n - \frac{\kappa_n \Delta U_p}{1 + T_n p} &= 0 \\ \Delta U_p - \frac{k_\varphi}{k_{np}} \left(\frac{\partial I_{CT}}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n + \frac{\partial I_{CT}}{\partial E_d} \Delta E_d - \frac{\partial I_{CT}}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n \right) - \\ - \kappa_{OV} \left(\frac{\partial U_{ш}}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n + \frac{\partial U_{ш}}{\partial E_d} \Delta E_d - \frac{\partial U_{ш}}{\partial E_d} \Delta \theta_n \right) &= 0 \\ \frac{\partial P'_{q\Sigma}}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n + \frac{\partial P'_{q\Sigma}}{\partial E_d} \Delta E_d + \left(\frac{\partial P'_{q\Sigma}}{\partial U_{ш}} - \frac{\partial P_s}{\partial U_{ш}} \right) \Delta U_{ш} - \\ - \left(\frac{\partial P_s}{\partial \theta_n} + \frac{\partial P'_{q\Sigma}}{\partial \theta_n} \right) \Delta \theta_n &= 0 \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n + \frac{\partial Q_n}{\partial E_d} \Delta E_d + \left(\frac{\partial Q_n}{\partial U_{ш}} - \frac{\partial Q_n}{\partial U_{ш}} \right) \Delta U_{ш} - \\ - \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} + \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \right) \Delta \theta_n &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.63)$$

На основе полученной системы уравнений (3.63) разработаны структурные схемы насосной станции и питающей электрической сети (рис. 30), которые состоят из структурных схем синхронного

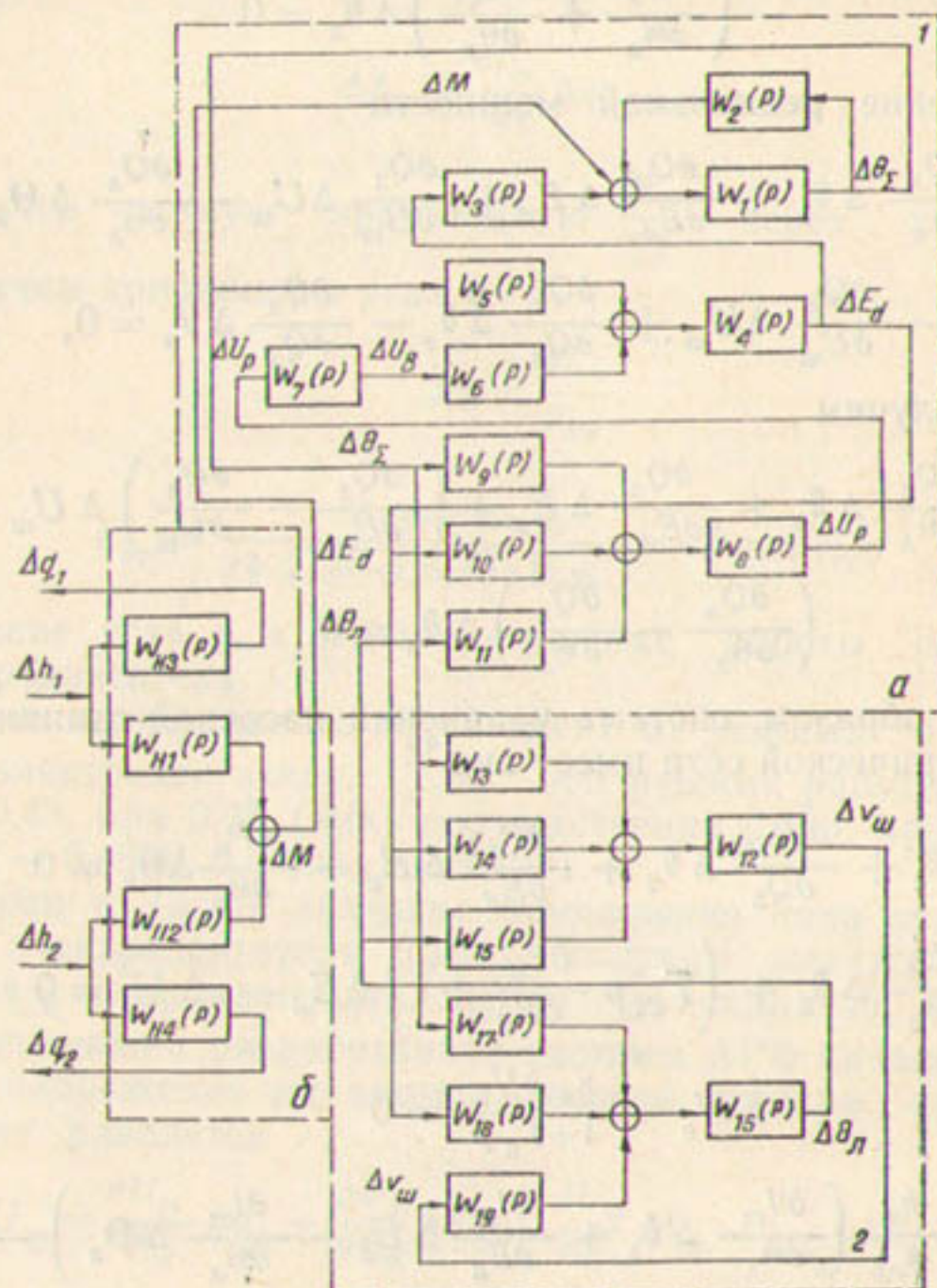


Рис. 30. Структурная схема насосной станции и питающей электрической сети.

1 — насосная станция: а) синхронный электродвигатель с системой АРВ, б) насос; 2 — питающая электрическая сеть.

электродвигателя с разработанной системой АРВ (канал на поддержание напряжения на шинах насосной станции отсутствует) и электрической сети. Ниже приведены значения передаточных функций структурной схемы.

$$W_1(p) = \frac{1}{T_j p^2}; W_2(p) = \frac{\partial P_n}{\partial \theta_\Sigma} - \frac{\partial P_{д\Sigma}}{\partial \theta_\Sigma}; W_3(p) = -\frac{\partial P_{д\Sigma}}{\partial E_d};$$

$$W_4(p) = \frac{1}{T_{d_0} p \cdot \frac{\partial E'_d}{\partial E_d} + 1}; \quad W_5(p) = -T_{d_0} p \frac{\partial E'_d}{\partial \theta_g}; \quad W_6(p) = -\kappa;$$

$$W_7(p) = \frac{\kappa_b \cdot \Delta V_p}{1 + T_b \cdot p}; \quad W_8(p) = \kappa_I; \quad W_9(p) = \frac{\partial I_{cr}}{\partial \theta_g};$$

$$W_{10}(p) = \frac{\partial I_{cr}}{\partial E_d}; \quad W_{11}(p) = \frac{\partial I_{cr}}{\partial \theta_g}; \quad W_{12}(p) = \frac{1}{\frac{\partial P'_{g\Sigma}}{\partial U_{III}} - \frac{\partial P_{\lambda}}{\partial U_{III}}};$$

$$W_{13}(p) = -\frac{\partial P'_{g\Sigma}}{\partial \theta_g}; \quad W_{14}(p) = -\frac{\partial P'_{g\Sigma}}{\partial E_d};$$

$$W_{15}(p) = \frac{\partial P_{\lambda}}{\partial \theta_g} + \frac{\partial P'_g}{\partial \theta_g}; \quad W_{16}(p) = \frac{1}{\frac{\partial Q_{\lambda}}{\partial \theta_{\lambda}} + \frac{\partial Q_g}{\partial \theta_g}};$$

$$W_{17}(p) = \frac{\partial Q_g}{\partial \theta_g}; \quad W_{18}(p) = \frac{\partial Q_g}{\partial E_d};$$

$$W_{19}(p) = \frac{\partial Q_g}{\partial U_{III}} - \frac{\partial Q_{\lambda}}{\partial U_{III}}.$$

Математические модели и структурные схемы насосной станции и питающей электрической сети дают возможность проведения математического моделирования всей системы с целью определения ее устойчивости, качества переходных процессов в ее составляющих и т. д.

Глава IV. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМ МАШИННОГО ВОДОПОДЪЕМА

Математическое моделирование объектов систем машинного водоподъема позволяет определить следующее: статические и динамические процессы в бьефах подводящих и отводящих каналов, обеспечивающие заданный режим их работы; границы допустимых режимов и ограничения на параметры режимов работы каналов; выбор САР бьефов насосных станций с заданным качеством переходных процессов; статическую и динамическую устойчивость синхронных электродвигателей насосных агрегатов с системой АРВ.

Исследования статических и динамических режимов синхронных электродвигателей насосных агрегатов дают возможность определить изменения токов напряжений в обмотках статора и ротора, а также активной и реактивной мощностей, электромагнитного момента и других параметров при различных нарушениях установившегося режима работы. Особенно важен характер изменения параметров электродвигателя при переходе из одного установившегося режима в другой.

Для синхронных электродвигателей насосных агрегатов наиболее характерные переходные режимы — пуск, самозапуск при кратковременных снижениях и исчезновениях напряжения питающей электрической сети, синхронизация и ресинхронизация, свободные и вынужденные колебания, качания при изменениях нагрузки на валу и параметров системы электроснабжения, режимы при АРВ электродвигателя.

Для определения характера изменения различных параметров в переходном режиме необходимо моделирование на ЭВМ статической и динамической устойчивости синхронного электродвигателя насосного агрегата с АРВ пропорционального и сильного действия, что позволит установить совместные режимы работы электродвигателей и питающей электрической сети при различных нарушениях режима.

Выбор системы автоматического регулирования бьефов подводящих и отводящих каналов

На основе разработанной математической модели, структурной схемы и алгоритмов расчета подводящего и отводящего каналов типового элемента каскада гидротехническое сооружение — насосная станция — гидротехническое сооружение промоделирова-

ны динамические процессы на примере подводящего и отводящего каналов Джизакской головной насосной станции при следующих параметрах системы: $i_1 = 0,000061$; $i_2 = 0,00005$; $l_1 = 25000$ м;

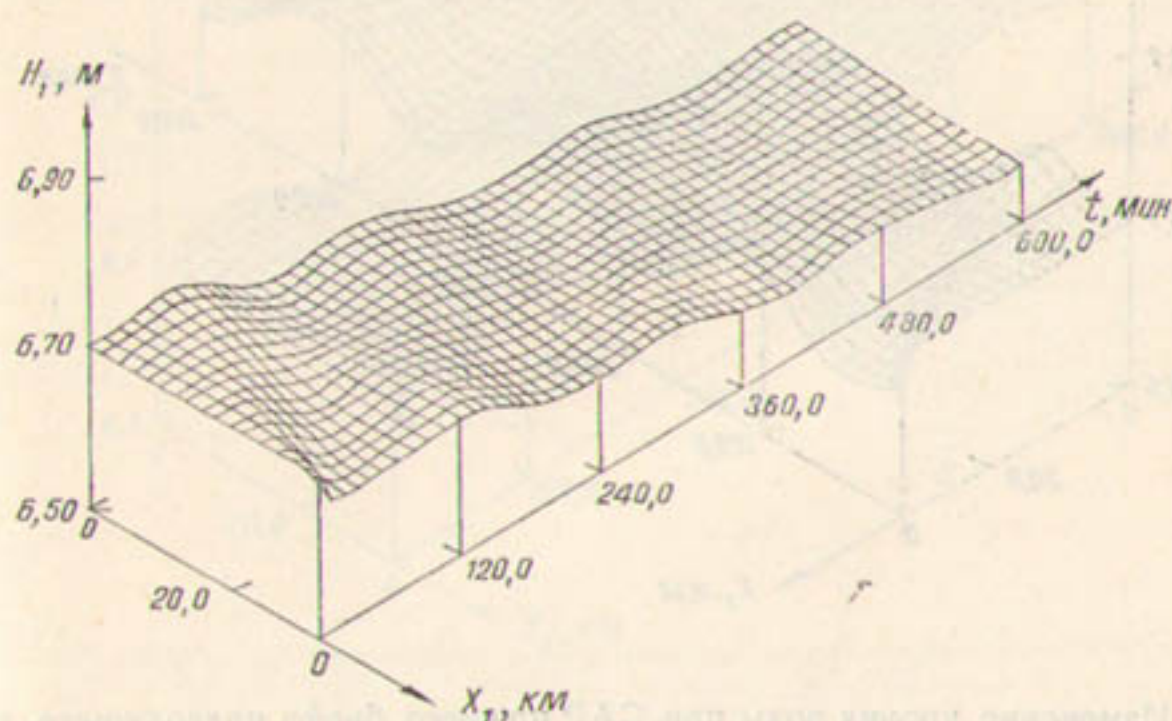
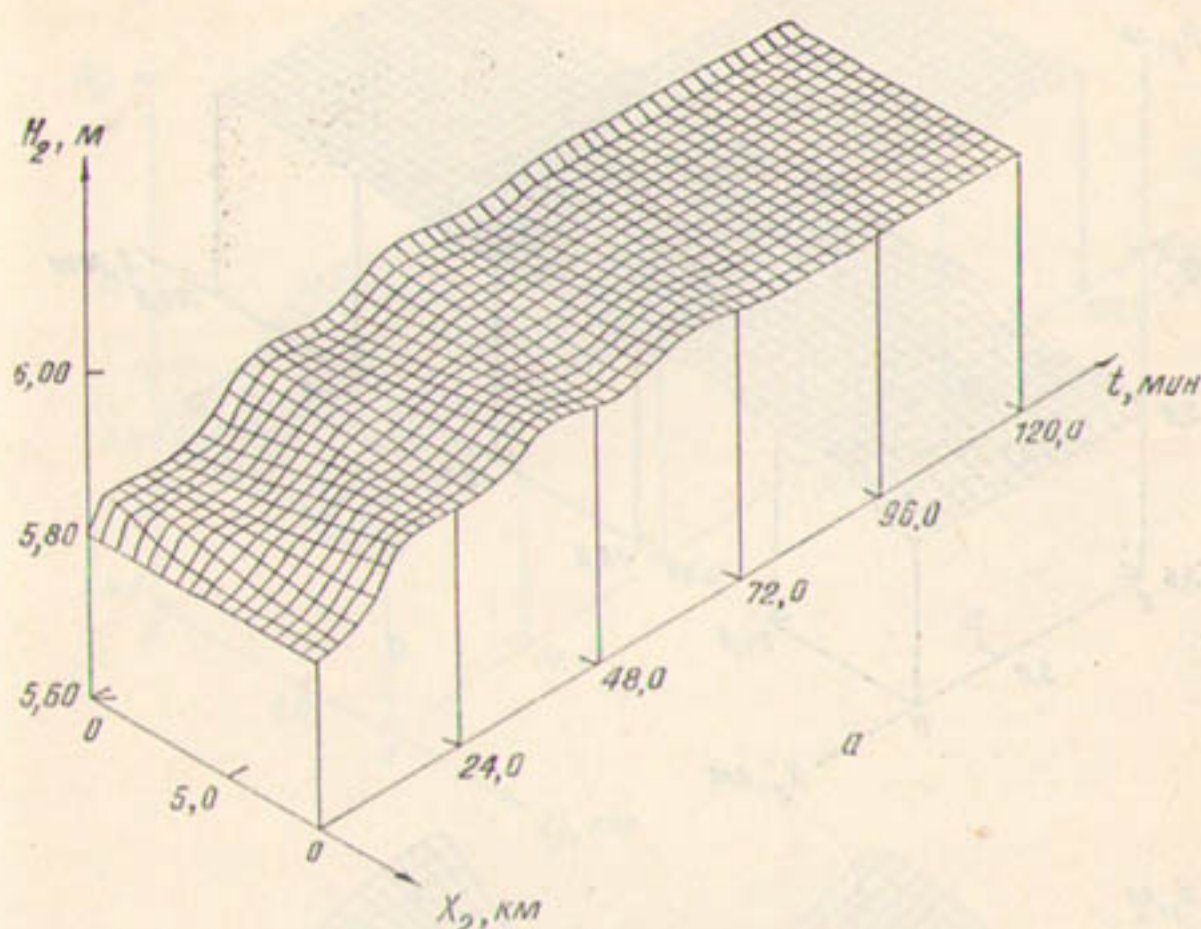


Рис. 31. Изменение уровня воды в каналах без САР.

$l_2 = 7628$ м; $m_1 = 4,0$; $m_2 = 3,0$; $b_1 = 35,5$ м; $b_2 = 16,6$ м; $Q_{10} = 450$ м³/с; $Q_{20} = 160$ м³/с; $H_{10} = 6,7$ м; $H_{20} = 5,8$ м; $\kappa_1 = 1,0$; $\kappa_2 = 2,5$; $n_1 = 0,017$; $n_2 = 0,017$.

Численные эксперименты на ЭВМ позволили проанализировать динамические процессы на подводящем и отводящем каналах при работе одного насосного агрегата производительностью $20 \text{ м}^3/\text{с}$:

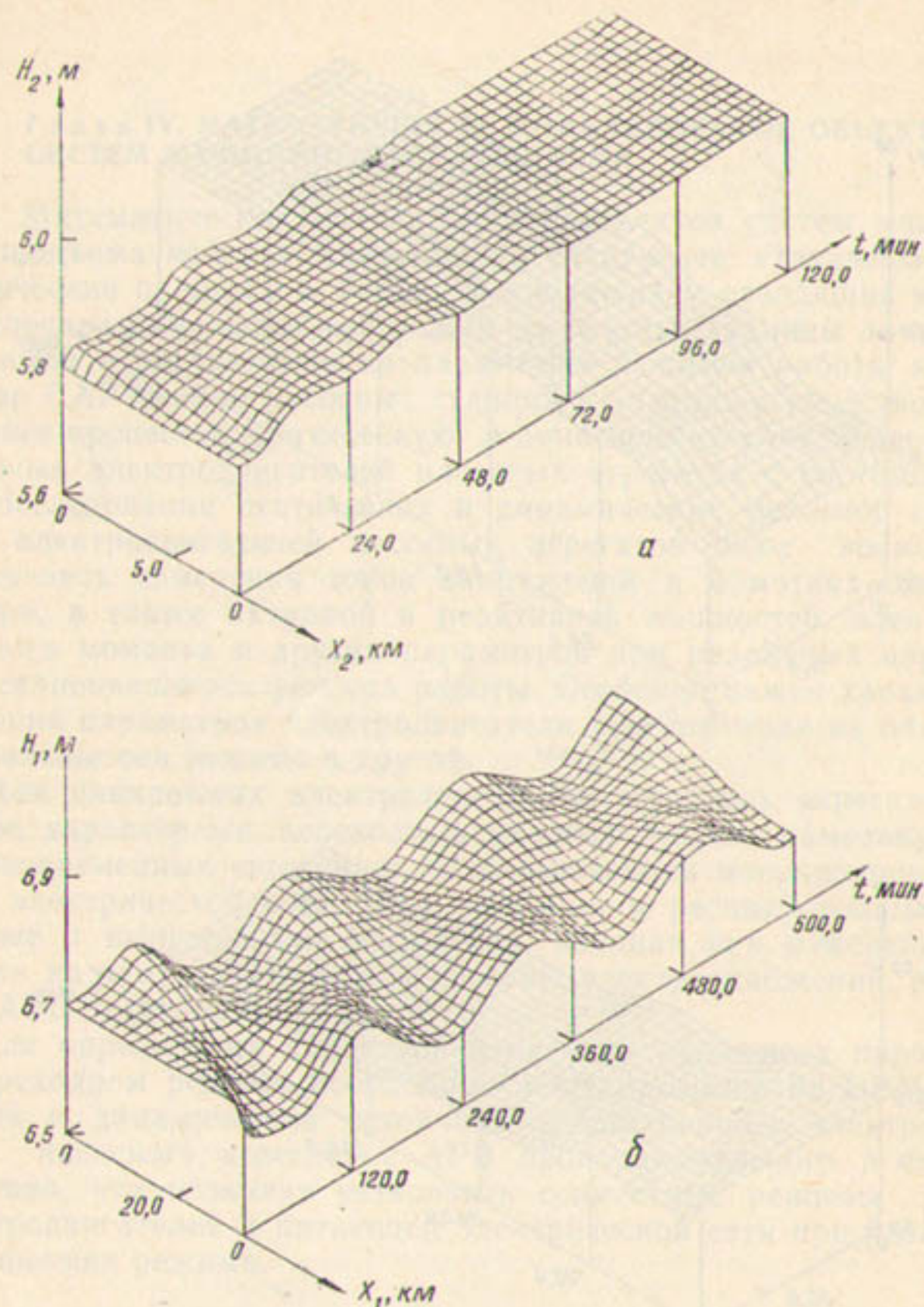


Рис. 32. Изменение уровня воды при САР нижнего бьефа подводящего канала и САР верхнего бьефа отводящего канала.

без САР; с САР уровни воды нижнего бьефа подводящего и САР уровней воды верхнего бьефа отводящего каналов; с САР перетекающих объемов на подводящем и САР уровня воды верхнего бьефа отводящего каналов.

В первом случае уровень воды в конце подводящего канала уменьшается (рис. 31 а), а в начале отводящего — увеличивается

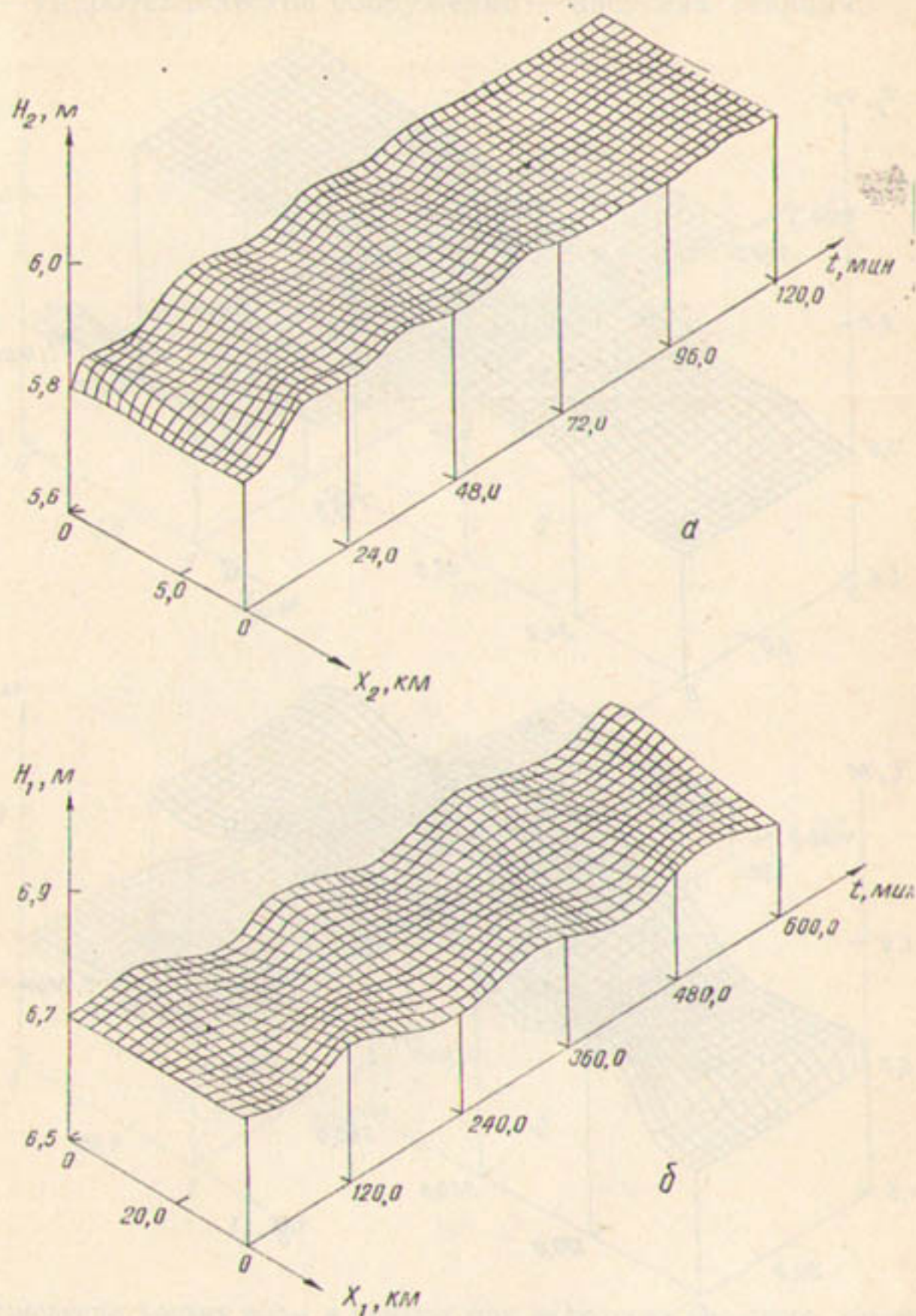


Рис. 33. Изменение уровня воды при САР с перетекающими объемами на подводящем канале и САР верхнего бьефа отводящего канала.

(рис. 31 б). Во втором случае уровень воды в каналах также отклоняется, но с меньшей степенью (рис. 32, а, б). В третьем — максимальное отклонение составляет ± 5 см (рис. 33).

Согласно результатам моделирования САР с перетекающими объемами на подводящем канале и САР уровня воды верхнего

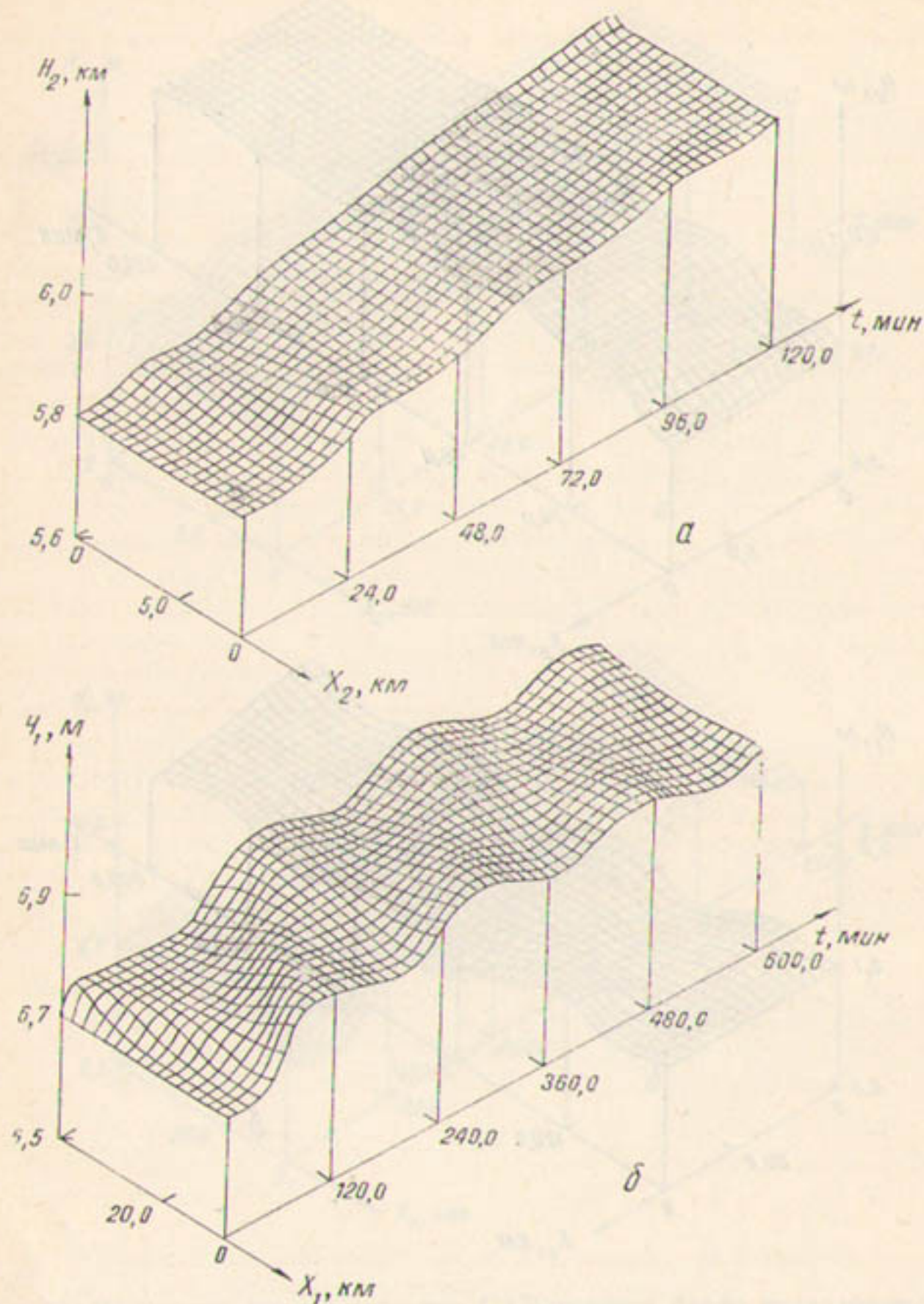


Рис. 34. Изменение уровня воды в каналах при включении насосного агрегата на 1 насосной станции, режим 2 не меняется.

бьефа отводящего канала позволяют уменьшить отклонение уровня воды в каналах.

Динамические процессы также промоделированы для отводящего и подводящего каналов типового элемента каскада насосная станция — гидротехническое сооружение — насосная станция.

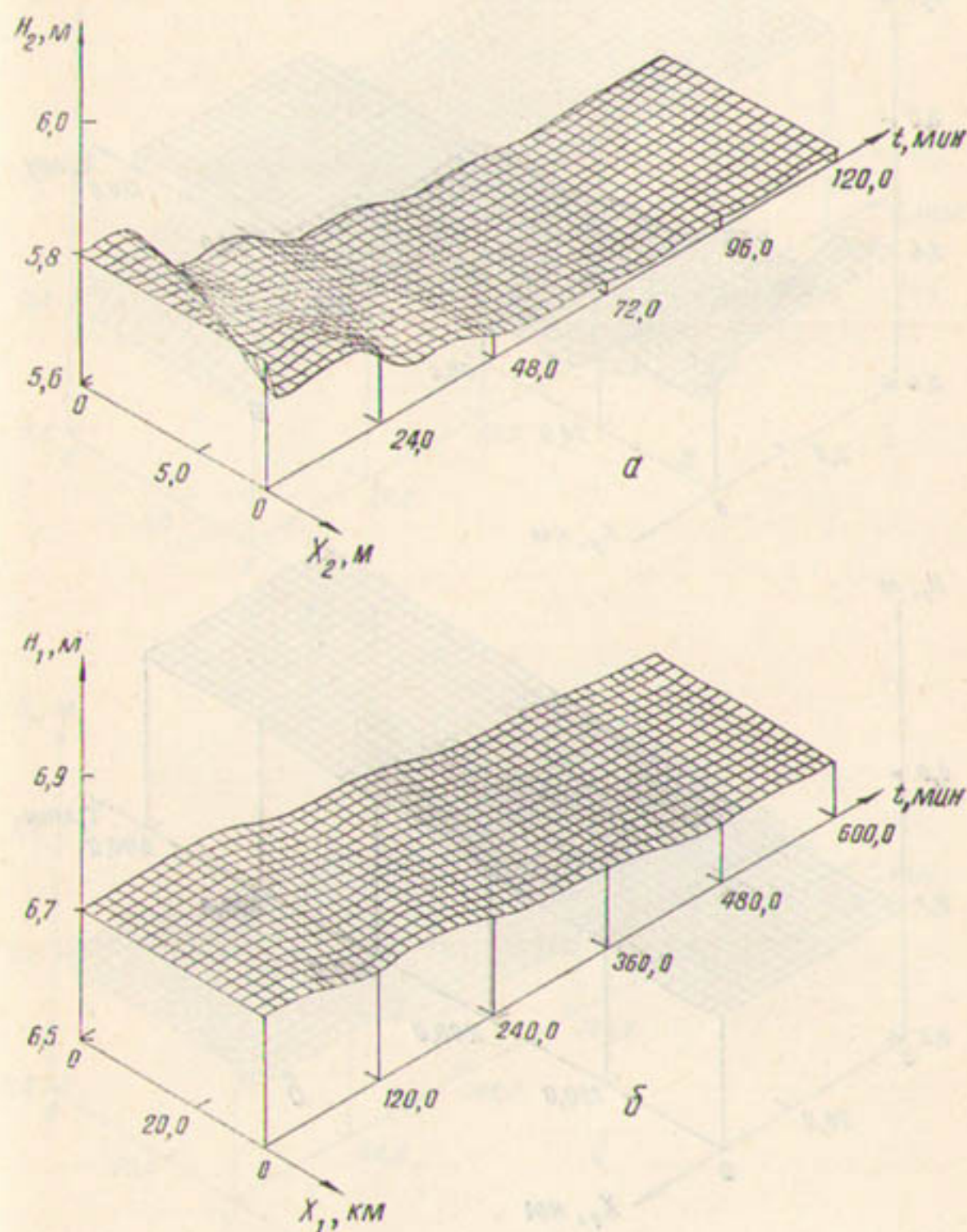


Рис. 35. Изменение уровня воды в каналах при включении насосного агрегата на 2 насосной станции, режим 1 не меняется.

Рассмотренная система может работать в различных режимах автоматического регулирования. Например, для второго участка канала, если $k_1=0$ и $k_2, k_3 \neq 0$, то система работает в режиме автоматического регулирования с перетекающими объемами, а при $k_1=k_3=0$ и $k_2 \neq 0$ по нижнему бьефу гидротехнического сооружения. В случае, если $k_1 \neq 0$ и $k_2=k_3=0$, то система работает в режиме

нале больше, чем в подводящем (рис. 37). В случае, когда одновременно включается и отключается насосный агрегат на обеих насосных станциях, степень отклонения уровней воды в каналах наименьшая (рис. 38, 39).

Результаты моделирования показывают, что для типового элемента каскада насосная станция — гидротехническое сооружение — насосная станция также можно рекомендовать САР с перетекающими объемами на подводящем канале и САР уровня воды верхнего бьефа отводящего канала, которые позволяют уменьшить отклонения уровней воды в каналах.

Статическая устойчивость синхронного электродвигателя насосного агрегата с автоматическим регулированием возбуждения

Из полученной системы уравнений насосной станции и питающей электрической сети (3.63) выделим систему уравнений синхронного электродвигателя с разработанной системой АРВ питающей электрической сети

$$\left. \begin{aligned} T_J p^2 \Delta \theta_{\Sigma} + \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \Delta \theta_{\Sigma} - \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \Delta \theta_{\Sigma} + \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial E_d} \Delta E_d &= 0 \\ T_{d_0} p \frac{\partial E_d'}{\partial \theta_{\Sigma}} \Delta \theta_{\Sigma} + \left(T_{d_0} p \frac{\partial E_d'}{\partial E_d} + 1 \right) \Delta E_d - \kappa \Delta U_{\Sigma} &= 0 \\ \Delta U_{\Sigma} - \frac{\kappa_{\Sigma} \Delta U_p}{T_{\Sigma} p + 1} &= 0 \\ \Delta U_p - \kappa_{01} \left(\frac{\partial I_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \Delta \theta_{\Sigma} + \frac{\partial I_{\Sigma}}{\partial E_d} \Delta E_d - \frac{\partial I_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \Delta \theta_{\Sigma} \right) &= 0 \\ \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \Delta \theta_{\Sigma} + \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial E_d} \Delta E_d + \left(\frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} - \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} \right) \Delta U_{\Sigma} - \\ - \left(\frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} + \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \right) \Delta \theta_{\Sigma} &= 0 \\ \frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \Delta \theta_{\Sigma} + \frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial E_d} \Delta E_d + \left(\frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} - \frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} \right) \Delta U_{\Sigma} - \\ - \left(\frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} + \frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \right) \Delta \theta_{\Sigma} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Система уравнений (4.1) имеет ненулевое решение, если ее определитель равен нулю, т. е.

$$\Delta = \begin{vmatrix} T_d p^2 + c_{11} + c_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{19} \\ c_{13} & 0 & 0 & -c_{15} & 0 & c_{20} \\ 0 & 0 & 0 & c_{16} & -c_{17} & 0 \\ -c_{14} & c_{14} & 0 & 0 & c_{18} & -c_{21} \\ c_1 & -(c_4 + c_1)(c_3 - c_5) & 0 & 0 & 0 & c_2 \\ c_6 & -(c_9 + c_6)(c_8 - c_{10}) & 0 & 0 & 0 & c_7 \end{vmatrix} = 0, \quad (4.2)$$

$$\text{где } c_1 = \frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial \theta_d}; \quad c_2 = \frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial E_d}; \quad c_3 = \frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}};$$

$$c_4 = \frac{\partial P_d}{\partial \theta_d}; \quad c_5 = \frac{\partial P_d}{\partial U_{\Sigma}}; \quad c_6 = \frac{\partial Q_d}{\partial \theta_d};$$

$$c_7 = \frac{\partial Q_d}{\partial E_d}; \quad c_8 = \frac{\partial Q_d}{\partial U_{\Sigma}}; \quad c_9 = \frac{\partial Q_d}{\partial \theta_d};$$

$$c_{10} = \frac{\partial Q_d}{\partial U_{\Sigma}}; \quad c_{11} = \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_d}; \quad c_{12} = \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_d};$$

$$c_{13} = \frac{\partial E'_d}{\partial \theta_d} T_d \cdot p; \quad c_{14} = \frac{\partial I_{\text{ст}}}{\partial \theta_d}; \quad c_{15} = k;$$

$$c_{16} = 1,0; \quad c_{17} = \frac{k_v}{T_v p + 1}; \quad c_{18} = 1,0;$$

$$c_{19} = \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial E_d}; \quad c_{20} = T_d p \frac{\partial E'_d}{\partial E_d}; \quad c_{21} = \frac{\partial I_{\text{ст}}}{\partial E_d}.$$

Раскрыв определитель (4.2), получим характеристическое уравнение системы

$$k_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0. \quad (4.3)$$

Коэффициенты характеристического уравнения (4.3) являются функциями параметров режимов работы синхронного электродвигателя, системы АРВ и питающей электрической системы, приведены в [64].

Используя метод Д-разбиения (50, 51), можно определить области устойчивости в плоскости различных вещественных параметров системы, так, например, общего коэффициента усиления системы k_0 и постоянной времени обмотки возбуждения возбудителя синхронного электродвигателя T_v (52).

Подставив в характеристическое уравнение $j\omega$ вместо p , найдем действительную и мнимую части $U(\omega)$ и $V(\omega)$, и порознь приравняем их нулю, получим систему уравнений относительно k_0 и T_v :

$$\left. \begin{aligned} U(\omega) &= T_v P_1(\omega) + \kappa_{0f} Q_1(\omega) + R_1(\omega) = 0 \\ V(\omega) &= T_v P_2(\omega) + \kappa_{0f} Q_2(\omega) + R_2(\omega) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

Рассмотрим (4.4) как систему двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными κ_{0f} и T_v и решим ее

$$T_v = \frac{\Delta_2}{\Delta} \quad \text{и} \quad \kappa_{0f} = \frac{\Delta_1}{\Delta}. \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} P_1(\omega) & Q_1(\omega) \\ P_2(\omega) & Q_2(\omega) \end{vmatrix} = P_1(\omega) Q_2(\omega) - P_2(\omega) Q_1(\omega); \\ \Delta_1 &= \begin{vmatrix} -R_1(\omega) & Q_1(\omega) \\ -R_2(\omega) & Q_2(\omega) \end{vmatrix} = R_2(\omega) Q_1(\omega) - R_1(\omega) Q_2(\omega); \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} P_1(\omega) - R_1(\omega) & Q_1(\omega) \\ P_2(\omega) - R_2(\omega) & Q_2(\omega) \end{vmatrix} = P_2(\omega) R_1(\omega) - P_1(\omega) R_2(\omega). \end{aligned}$$

По результатам расчета построена кривая Д-разбиения, показывающая область устойчивости в плоскости κ_{0f} и κ_{0f} и позволяющая выбрать такие параметры, при которых обеспечивается статическая устойчивость синхронного электродвигателя насосного агрегата.

Электромашины возбуждения постоянного тока, используемые в основном в качестве систем возбуждения синхронных электродвигателей насосных агрегатов, не удовлетворяют всем требованиям современной эксплуатации. Значительная инерционность и ограниченный потолок возбуждения системы уменьшает быстродействие и ухудшает качество переходных процессов при различных нарушениях нормального режима эксплуатации. Эти недостатки в некоторой степени уменьшаются при оснащении электромашиных систем возбуждения с АРВ сильного действия, т. е. такими регуляторами, которые реагируют не только на отклонение регулируемого параметра, но и на величину скорости и ускорения (первую и вторую производные по времени) его изменения, при котором устойчивость синхронного электродвигателя сохраняется при больших внутренних углах.

При использовании АРВ сильного действия на синхронных электродвигателях насосных агрегатов их необходимо исследовать для определения оптимальной настройки.

Регулирование возбуждения осуществляется по следующему закону:

$$\Delta V_p = (\kappa_{0n} + \kappa_{1n} \cdot p + \kappa_{2n} \cdot p^2) \Delta \Pi, \quad (4.6)$$

где κ_{0n} , κ_{1n} , κ_{2n} — коэффициенты отклонения первой и второй производной параметров регулирования;
 $\Delta \Pi$ — отклонение параметра регулирования.

При исследовании АРВ сильного действия обычно выделяют два параметра регулятора — коэффициенты усиления k_{1n} и k_{2n} и рассматривают их взаимное влияние. Различные сочетания этих параметров дают замкнутые области устойчивости, по их величине можно определить такое сочетание k_{1n} и k_{2n} , при котором получаются наибольшие области устойчивости. По полученным областям устойчивости осуществляется оптимальная настройка АРВ сильного действия.

Характеристическое уравнение системы (4.1) с учетом (4.6) имеет шестой порядок

$$a_0 p^6 + a_1 p^5 + a_2 p^4 + a_3 p^3 + a_4 p^2 + a_5 p + a_6 = 0. \quad (4.7)$$

Коэффициенты характеристического уравнения (4.7), как функции параметров режимов работы синхронного электродвигателя, системы АРВ пропорционального и сильного действия, питающей электрической сети, приведены в [64].

Основное средство аналитического исследования заключается в выявлении зависимости коэффициентов характеристического уравнения системы (4.7) от режима. Целесообразно разбить коэффициенты на отдельные составляющие Δa_{0-6} , обусловленные действием регулирования, и составляющие a_{0-6} , не зависящие от него.

Анализ составляющих коэффициентов характеристического уравнения системы (4.7), проведенный на основе [53], показал, что оптимальными параметрами регулирования служат ток статора синхронного электродвигателя и напряжение на шинах насосной станции.

Закон регулирования возбуждения с учетом выбранных параметров имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta V_p = & \left(k_{0I} + \frac{k_{1I} p}{T_d p + 1} + \frac{k_{2I} p^2}{T_{dI} p + 1} \right) \left(\frac{\partial I_{ст}}{\partial \theta_d} \Delta \theta_{\Sigma} + \right. \\ & \left. + \frac{\partial I_{ст}}{\partial E_d} \Delta E_d - \frac{\partial I_{ст}}{\partial \theta_d} \Delta \theta_d \right) + \left(k_{0v} + \frac{k_{1v} p}{T_d p + 1} + \right. \\ & \left. + \frac{k_{2v} p^2}{T_{dI} p + 1} \right) \left(\frac{\partial U_{ш}}{\partial \theta_d} \Delta \theta_{\Sigma} - \frac{\partial U_{ш}}{\partial \theta_d} \Delta \theta_d \right), \end{aligned} \quad (4.8)$$

где T_d , T_{dI} — постоянные времени дифференцирующего и двойного дифференцирующего элементов регулятора.

На основании характеристического уравнения системы (4.7), используя метод Д-разбиения, можно построить области устойчивости в плоскости коэффициентов регулирования по первой и второй производным тока статора синхронного электродвигателя и напряжения на шинах насосной станции.

Для определения влияния параметров системы регулирования на области устойчивости при различных параметрах регулятора

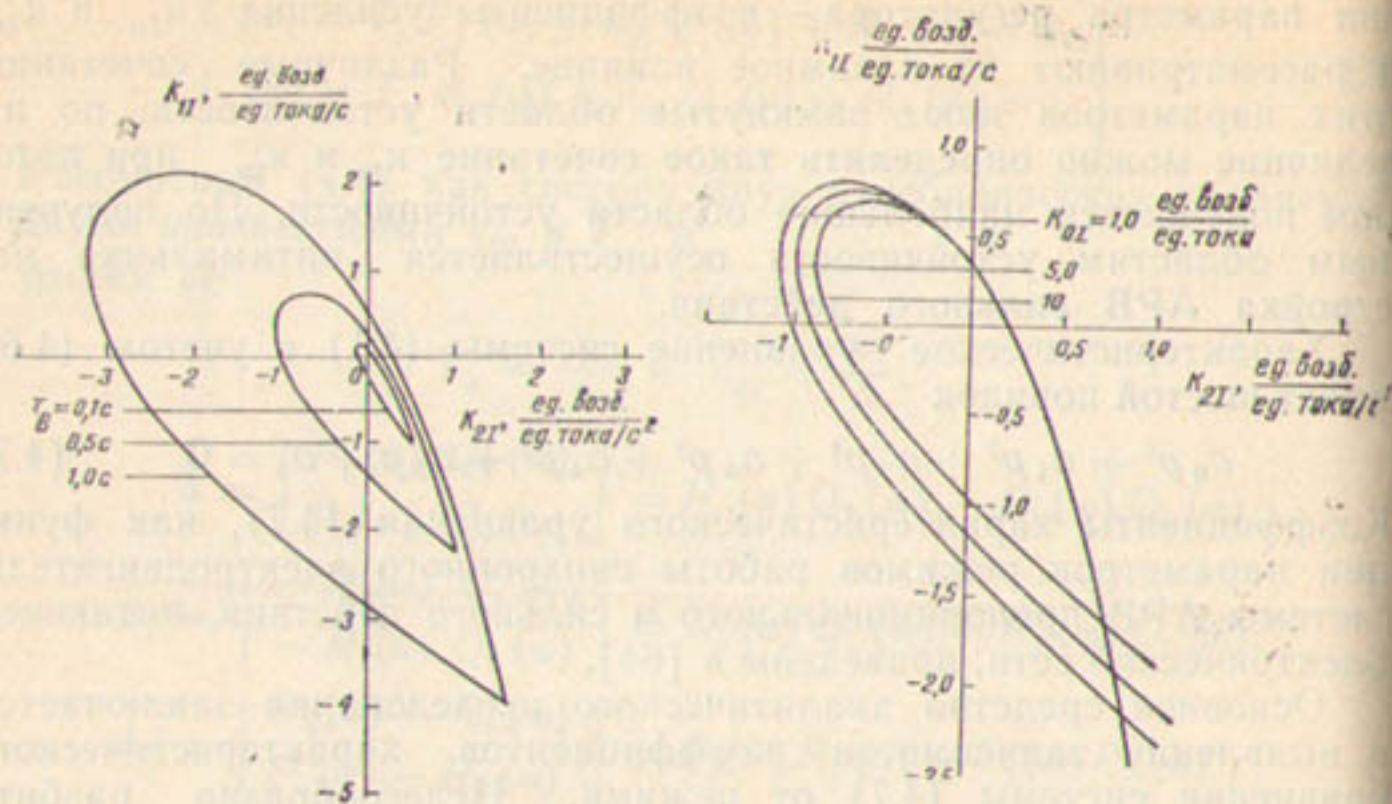


Рис. 40. Область устойчивости в плоскости коэффициентов усиления по производным тока статора при различных значениях постоянного времени обмотки возбуждения возбудителя синхронного электродвигателя насосного агрегата.

Рис. 41. Область устойчивости в плоскости коэффициентов усиления по производным тока статора при различных значениях коэффициента усиления по отклонению тока статора синхронного электродвигателя насосного агрегата.

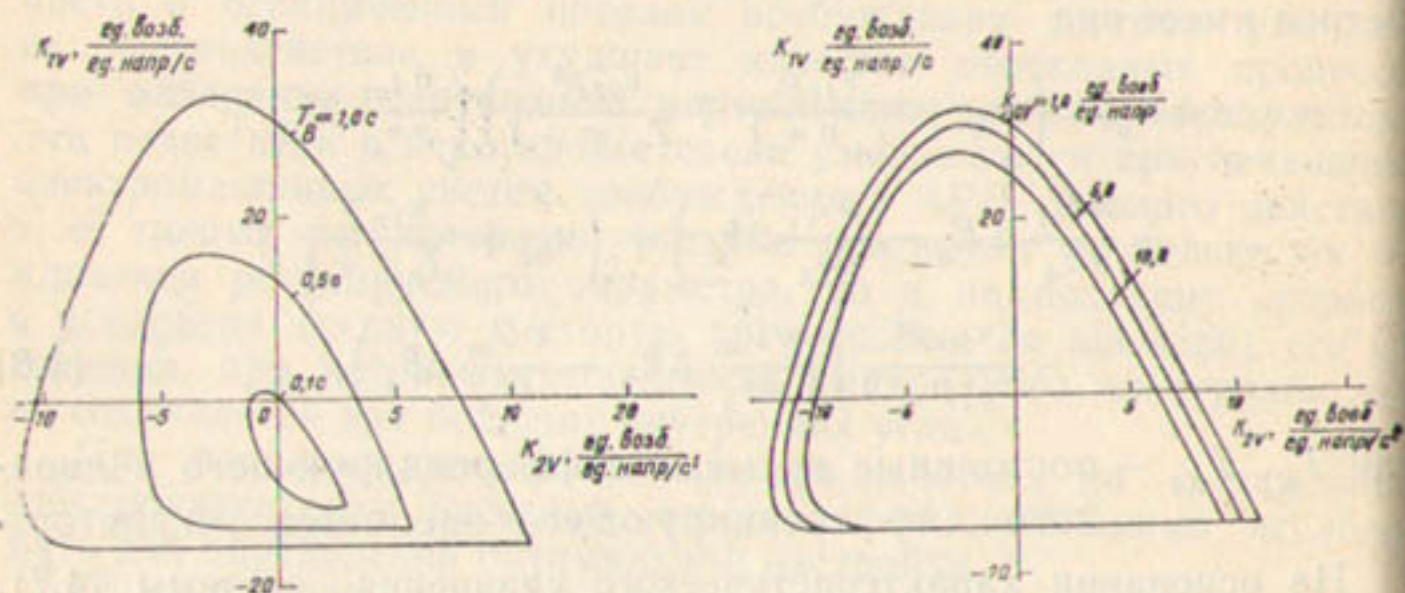


Рис. 42. Область устойчивости в плоскости коэффициентов усиления по производным напряжения при различных значениях постоянного времени обмотки возбуждения возбудителя синхронного электродвигателя насосного агрегата.

Рис. 43. Область устойчивости в плоскости коэффициентов усиления по производным напряжения при различных значениях коэффициента усиления по отклонению напряжения синхронного электродвигателя насосного агрегата.

построены соответствующие области устойчивости [52]. Например, при номинальном режиме работы синхронного электродвигателя и параметрах регулятора $T_g=0,01$ с, $T_{gg}=0,04$ с. Области устойчивости при изменении T_v и коэффициентов усиления по отклонению в плоскости коэффициентов регулирования по первой и второй производным тока статора приведены на рис. 40, 41, а по напряжению на шинах насосной станции — на рис. 42 и 43. В обоих случаях с понижением постоянной времени от $T_v=1,0$ с до $T_v=0,1$ с при постоянных коэффициентах усиления по отклонению ($k_{0I}=1,0$ ед. возб/ед. тока; $k_{0v}=1,0$ ед. возб/ед. напр.; рис. 40, 42) области устойчивости уменьшаются. Это согласуется с тем положением [54], при котором уменьшение T_v уменьшает области устойчивости в плоскости коэффициентов K_{1v} и K_{2v} .

С возрастанием коэффициента усиления по отклонению тока $k_{0I}=1,0—10$ ед. возб/ед. тока и напряжения $k_{0v}=1,0—10$ ед. возб/ед. напр. при постоянном значении $T_v=0,5$ с (рис. 41) и $T_v=1,0$ с (рис. 43) области устойчивости

также уменьшаются, но степень их уменьшения меньше по сравнению с предыдущими областями.

При АРВ сильного действия, возбуждение синхронного электродвигателя регулируется в функции нескольких режимных параметров [49]. В этом случае может быть множество вариаций значений параметров и коэффициентов регулирования. Для определения оптимального варианта структуры сигналов регулятора обычно используются структурные коэффициенты системы АРВ [54]. Введение этих коэффициентов позволяет сопоставить размеры областей устойчивости при различных структурах сигналов производных.

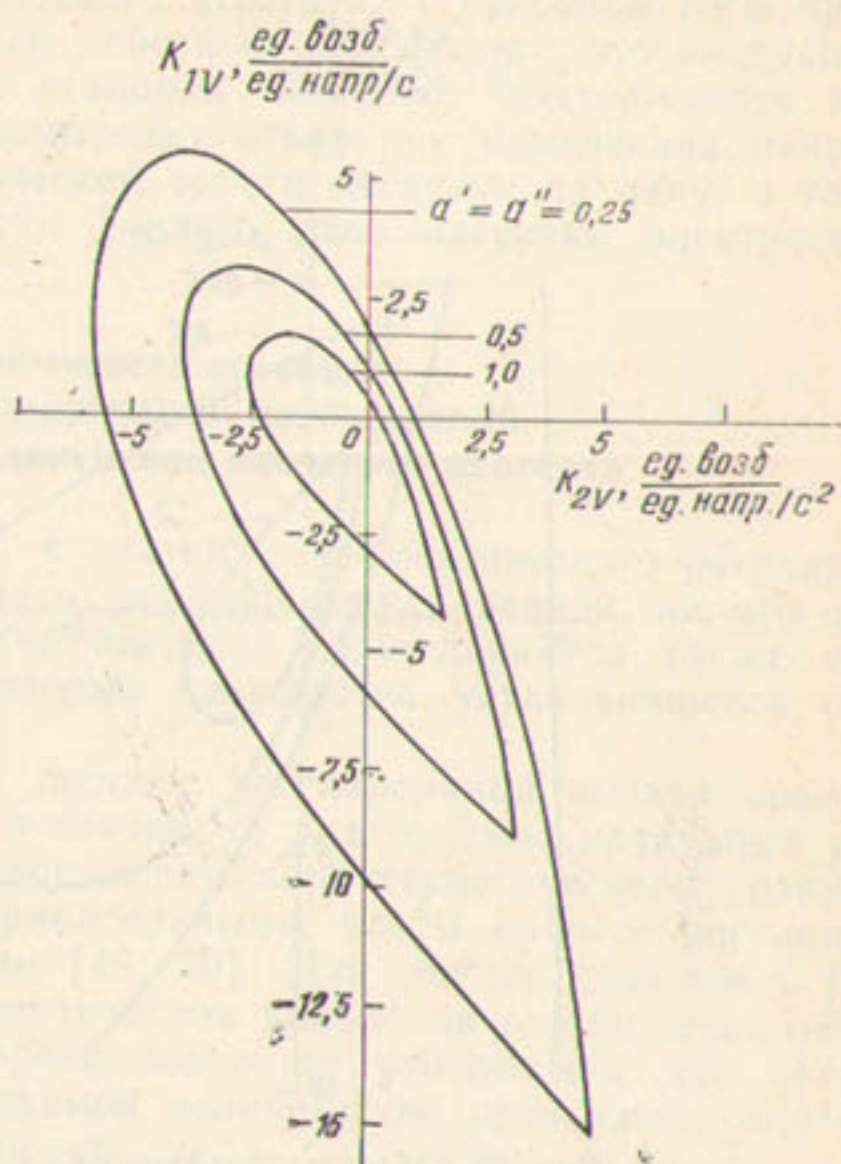


Рис. 44. Область устойчивости в плоскости коэффициентов усиления по производным напряжения синхронного электродвигателя при различных положительных значениях структурных коэффициентов.

Исследования проводились при фиксированных значениях структурных коэффициентов $a' = \kappa_{11}/\kappa_{10}$, $a'' = \kappa_{21}/\kappa_{20}$ и регулировании возбуждения по отклонениям первой и второй производным тока статора синхронного электродвигателя и напря-

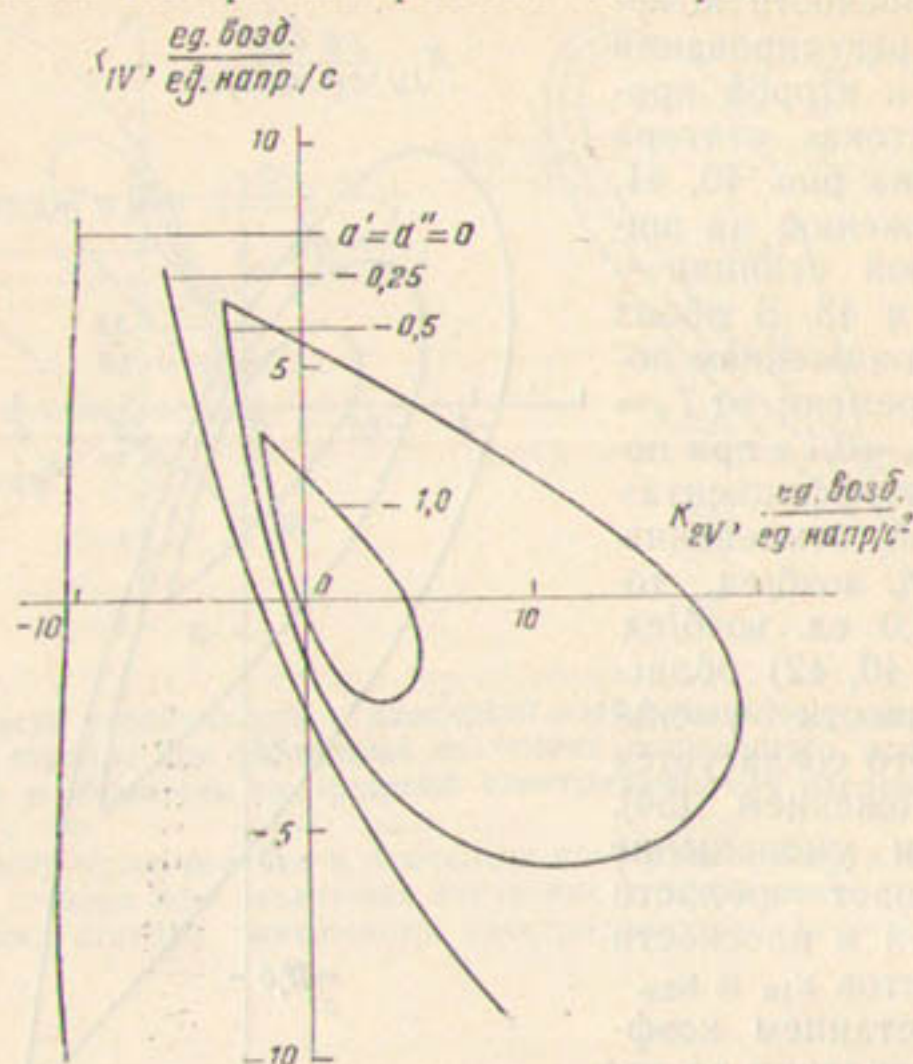


Рис. 45. Область устойчивости в плоскости коэффициентов усиления по производным напряжения синхронного электродвигателя при различных отрицательных значениях структурных коэффициентов.

жения на шинах насосной станции с $T_B = 1,0$ с, $T_d = 0,01$ с и $T_{дл} = 0,04$ с. Предполагалось, что $a' = a''$.

Области устойчивости построены в плоскости коэффициентов регулирования по производным напряжения на шинах насосной станции κ_{1v} и κ_{2v} при $a' = a'' = 0; 0,15; 0,5; 1,0$ (рис. 44) и $a' = a'' = 0; -0,25; -0,5; -1,0$ (рис. 45).

Сопоставление размеров областей устойчивости показывает, что с увеличением фиксированных значений коэффициентов a' и a'' , они уменьшаются за счет ухудшения связи между электро-механическими и электромагнитными контурами структурной схемы системы АРВ.

На основе полученных областей устойчивости можно построить обобщенные зависимости $\kappa_n' = f(a')$ и $\kappa_n'' = f(a'')$ [54], по которым осуществляется синтез такого сочетания производных режимных величин для обеспечения предельно допускаемых значений коэффициентов усиления, и выбор оптимального варианта структуры

схемы системы АРВ синхронного электродвигателя насосного агрегата.

Результаты моделирования статической устойчивости синхронного электродвигателя насосного агрегата с системой АРВ пропорционального и сильного действия показывают, что внедрение регуляторов на насосных станциях позволяет поддерживать заданный режим работы электродвигателя при изменениях напряжения питающей электрической сети и нагрузки на валу, а также повышать устойчивость данного узла нагрузки электросистемы.

Апериодическая устойчивость системы автоматического регулирования возбуждения синхронного электродвигателя насосного агрегата

Кроме устойчивости, в системах автоматического регулирования необходимо учитывать качество регулирования, на что существенно влияет характер внешних возмущений, а также начальные условия, при которых нарушается установившееся состояние системы.

Установлено, что если процесс регулирования вызван возмущением в виде единичного скачка, то для нулевых начальных условий достаточно иметь все корни характеристического уравнения вещественными и отрицательными, чтобы процесс регулирования был аperiодическим [49, 50]. Для любых начальных условий наличие в характеристическом уравнении только вещественных и отрицательных корней позволяет утверждать, что количество колебаний регулируемой величины не превышает степени характеристического уравнения.

Определим условия, при которых процесс регулирования в системе АРВ синхронного электродвигателя насосного агрегата будет аperiодическим. Для этого воспользуемся предложенным М. В. Мееровым критерием аperiодической устойчивости [50]. Для того, чтобы корни характеристического уравнения (4.3) были вещественными и отрицательными, необходимо и достаточно, чтобы все диагональные определители таблицы, составленные из коэффициентов уравнения, были больше нуля

$$\Delta_8 = \begin{vmatrix} 4a_0 & a_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3a_1 & a_1 & 4a_0 & a_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2a_2 & a_2 & 3a_1 & a_1 & 4a_0 & a_0 & 0 & 0 \\ a_3 & a_3 & 2a_2 & a_2 & 3a_1 & a_1 & 4a_0 & a_0 \\ 0 & a_4 & a_3 & a_3 & 2a_2 & a_2 & 3a_1 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & a_4 & a_3 & a_3 & 2a_2 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_4 & a_3 & a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_4 \end{vmatrix}. \quad (4.9)$$

Для характеристического уравнения четвертой степени, согласно критерию, получены следующие условия

$$\Delta_1 = 4a_0 > 0 \quad (4.10)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 4a_0 & a_0 \\ 3a_1 & a_1 \end{vmatrix} = a_0 a_1 > 0 \quad (4.11)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 4a_0 & a_0 & 0 \\ 3a_1 & a_1 & 4a_0 \\ 2a_2 & a_2 & 3a_1 \end{vmatrix} = a_0 (3a_1^2 - 8a_0 a_2) > 0 \quad (4.12)$$

и так далее.

Границу апериодической устойчивости дает равенство к нулю предпоследнего определителя М. В. Меерова

$$\Delta_7 = \begin{vmatrix} 4a_0 & a_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3a_1 & a_1 & 4a_0 & a_0 & 0 & 0 & 0 \\ 2a_2 & a_2 & 3a_1 & a_1 & 4a_0 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_3 & 2a_2 & a_2 & 3a_1 & a_1 & 4a_0 \\ 0 & a_4 & a_3 & a_3 & 2a_2 & a_2 & 3a_1 \\ 0 & 0 & 0 & a_4 & a_3 & a_3 & 2a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_4 & a_3 \end{vmatrix} = 0 \quad (4.13)$$

Раскрыв Δ_7 , получим

$$\begin{aligned} \Delta_7 = & a_0 a_1^2 a_2^2 a_3^2 - 4a_0 a_1^2 a_2^3 a_4 + 8a_0 a_1^3 a_2 a_3 a_4 - 4a_0 a_1^3 a_3^3 - \\ & - 27a_0 a_1^4 a_4^2 - 6a_0^2 a_1^2 a_3^2 a_4 + 144a_0^2 a_1^2 a_2^2 a_4^2 + 18a_0^2 a_1 a_2 a_3^3 - \\ & - 80a_0^2 a_1 a_2^2 a_3 a_4 - 192a_0^2 a_1 a_3 a_4^2 - 4a_0^2 a_2^3 a_3^2 + 16a_0^2 a_2^4 a_4 + \\ & + 144a_0^3 a_1 a_3^2 a_4 - 128a_0^3 a_2^2 a_4^2 - 27a_0^3 a_3^4 + 256a_0^4 a_4^3 = 0. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Известно, что переход через нуль величины свободного члена a_4 характеристического уравнения (4.3) определяет границу апериодического нарушения устойчивости САР [49]

$$\begin{aligned} a_4 = K_{ol} \left\{ \left[\frac{E_d V}{x_{d\Sigma}} \cos \theta_\Sigma + U^2 \left(\frac{1}{x_{q\Sigma}} - \frac{1}{x_{d\Sigma}} \right) \cos 2\theta_\Sigma \right] x_{d\Sigma} \times \right. \\ \left. \times \left\{ \left(E_d x_{q\Sigma}^2 - U x_{q\Sigma}^2 \cos \theta_\Sigma \right) - \left[E_d x_{q\Sigma}^2 V \sin \theta_\Sigma + \right. \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + U^2 \cos \theta_{\Sigma} \sin \theta_{\Sigma} (x_{d\Sigma}^2 - x_{q\Sigma}^2) \Big] \times \\
& \times \frac{\left(\frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} - \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} \right) \frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial E_d} - \frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial E_d} \left(\frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} - \frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} \right)}{\left(\frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} - \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} \right) \left(\frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} - \frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \right) - \left(\frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} + \frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \right) \left(\frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} - \frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} \right)} \Big] - \\
& - U \sin \theta_{\Sigma} \left[E_d x_{q\Sigma}^2 U \sin \theta_{\Sigma} + U^2 \cos \theta_{\Sigma} \sin \theta_{\Sigma} (x_{d\Sigma}^2 - x_{q\Sigma}^2) \times \right. \\
& \times \left[1 + \frac{\left(\frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} - \frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} \right) \frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} - \frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \left(\frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} - \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} \right)}{\left(\frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} - \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} \right) \left(\frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} - \frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \right) - \left(\frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} + \frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial \theta_{\Sigma}} \right) \left(\frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} - \frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma}} \right)} \right] \Big] + \\
& + \left[\frac{E_d U}{x_{d\Sigma}} \cos \theta_{\Sigma} + U^2 \left(\frac{1}{x_{q\Sigma}} - \frac{1}{x_{d\Sigma}} \right) \cos 2\theta_{\Sigma} \right] \cdot x_{d\Sigma}^2 \cdot x_{q\Sigma} \times \\
& \times \sqrt{E_d x_{q\Sigma}^2 - 2E_d U x_{q\Sigma}^2 \cos \theta_{\Sigma} + U^2 (x_{q\Sigma}^2 \cos^2 \theta_{\Sigma} + x_{d\Sigma}^2 \sin^2 \theta_{\Sigma})} = 0,
\end{aligned}
\tag{4.15}$$

где κ_{0I} — общий коэффициент усиления системы АРВ синхронного электродвигателя на постоянство поддержания коэффициента мощности;

θ_{Σ} — внутренний угол электродвигателя, зависящий от нагрузки на валу.

Представляет большой интерес сравнение результатов исследования аperiodичности переходных процессов по $\Delta_7=0$ и $a_4=0$, которые определяют границу аperiodической устойчивости.

Для определения значений общего коэффициента усиления системы АРВ, при которых наступает граница аperiodической устойчивости, необходимо построить зависимости $\kappa_{0I} = f(\theta_{\Sigma})$ при $\Delta_7=0$ и $a_4=0$.

Коэффициент κ_{0I} входит в выражение (4.14) и (4.15) линейно и, решив уравнения относительно κ_{0I} , получим зависимость $\kappa_{0I} = f(\theta_{\Sigma})$ для обоих случаев. Для этого зададим значение θ_{Σ} и определим те значения κ_{0I} , при которых $\Delta_7=0$ и $a_4=0$.

Используя схему электроснабжения, найдем параметры синхронного электродвигателя и питающей электрической сети, величины которых изменяются в зависимости от нагрузки на валу насосного агрегата. Приведем все сопротивления к единым базисным условиям. Выберем базисное напряжение $U_6=220$ кВ и базисную мощность $S_6=45$ МВА.

Суммарное реактивное сопротивление понижающих трансформаторов и линии электропередачи равняется

$$x_c = x_c [O_m] \frac{S_6}{U_6^2} = 176 \frac{45}{220^2} = 0,164 \text{ о. е.} \quad (4.16)$$

Синхронное реактивное сопротивление синхронного электродвигателя по продольной оси

$$x_{d\lambda} = x_{d\lambda} [\text{о. е.}] \frac{S_6 U_{\text{ш}}^2}{S_{\text{ш}} U_6^2} k_T^2 = 1,319 \frac{45 \cdot 10,5^2}{50 \cdot 220^2} \left(\frac{220}{10,5} \right)^2 = 1,19 \text{ о. е.}, \quad (4.17)$$

где $S_{\text{ш}} = 50 \text{ мВА}$ — полная мощность синхронных электродвигателей насосной станции Шерабад;

$U_{\text{ш}} = 10,5 \text{ кВ}$ — номинальное напряжение на шинах насосной станции;

k_T — коэффициент трансформации понижающих трансформаторов.

Аналогично по поперечной оси $x_{q\lambda} = 0,745 \text{ о. е.}$ и переходное реактивное сопротивление по продольной оси $x'_{d\lambda} = 0,28 \text{ о. е.}$

Суммарные реактивные сопротивления синхронных электродвигателей и питающей электрической сети

$$\begin{aligned} x_{d\Sigma} &= x_{d\lambda} + x_c = 1,19 + 0,164 = 1,354 \text{ о. е.} \\ x_{q\Sigma} &= x_{q\lambda} + x_c = 0,745 + 0,164 = 0,909 \text{ о. е.} \\ x'_{d\Sigma} &= x'_{d\lambda} + x_c = 0,28 + 0,164 = 0,443 \text{ о. е.} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Результаты расчета параметров синхронных электродвигателей и питающей электрической сети, величины которых зависят от нагрузки на валу, приведены в табл. 4.

Зависимости $k_{0f} = f(\theta_z)$ при $\Delta_7 = 0$ и $a_4 = 0$ показаны на рис. 46.

Анализ зависимостей показывает, что величина общего коэффициента усиления, полученная по $a_4 = 0$ меньше, чем по $\Delta_7 = 0$, так как при расчете не учитываются такие параметры синхронного электродвигателя, как постоянная инерция — T_j ; постоянные времени обмотки возбуждения — T_{d0} и возбудителя — T_v , которые существенно влияют на величину k_{0f} . При моделировании по $a_4 = 0$ определяется граница устойчивости без требования качества переходных процессов в системе АРВ.

Моделированием по критерию апериодической устойчивости М. В. Меерова определяются действительные значения коэффициентов усиления системы АРВ, так как учитываются все параметры синхронного электродвигателя. По $\Delta_7 = 0$ находится граница устойчивости с заранее заданным апериодическим характером переходных процессов в системе АРВ.

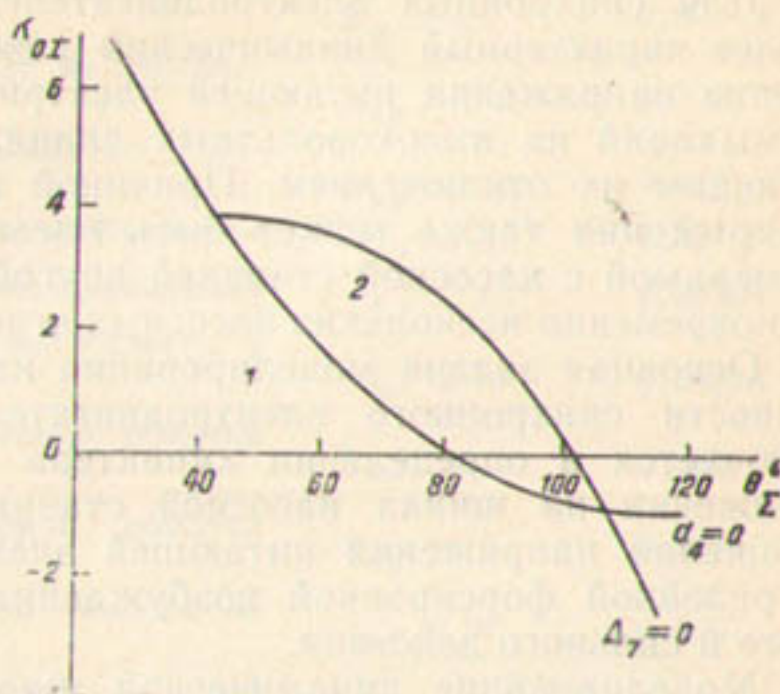
Полученные кривые разделяют плоскость параметров на три области: 1 — неустойчивости; 2 — колебательной устойчивости;

3 — аperiodической устойчивости. При одном и том же значении θ_{Σ} значение k_{0I} в области аperiodической устойчивости должно быть больше, чем в области колебательной устойчивости.

Таким образом, сравнение результатов моделирования аperiodической устойчивости по критерию М. В. Меерова и равенству

Рис. 46 Зависимость общего коэффициента усиления систем АРВ от суммарного угла нагрузки синхронного электродвигателя насосного агрегата по критерию аperiodической устойчивости М. В. Меерова ($\Delta_7=0$) и равенству по нулю свободного члена характеристического уравнения ($a_4=0$).

Области: 1 — неустойчивости, 2 — колебательной устойчивости, 3 — аperiodической.



нулю свободного члена характеристического уравнения показывает, что по $a_4=0$ учитывается только статика системы АРВ и поэтому определяются заниженные значения коэффициентов уси-

Т а б л и ц а 4

$P_d - P_{\Sigma}$	E_d , о. е.	Q_d , о. е.	θ_d	θ_d	θ_{Σ}	k_{0I} при $a_4=0$	k_{0I} при $\Delta_7=0$
0,5	1,18	0,02	4° 45'	30° 15'	35°	4,95	4,0
0,8	1,43	0,05	7° 30'	42° 30'	50°	2,84	3,8
1,0	1,62	0,58	3° 30'	47° 30'	57°	1,88	3,7
1,3	1,94	0,14	12° 20'	52° 40'	65°	1,22	3,45
1,5	2,16	0,19	14° 10'	55° 50'	70°	0,764	3,2
1,8	2,52	0,27	17° 10'	57° 50'	75°	0,447	2,9
2,1	2,87	0,37	20° 10'	59° 50'	80°	0,065	2,5
2,5	3,40	0,54	24° 20'	60° 40'	85°	-0,26	2,1

ления, а по $\Delta_7=0$ учитывается динамика системы АРВ и определяются действительные значения коэффициентов усиления, что очень важно при выборе и разработке САР с высоким качеством переходных процессов.

Динамическая устойчивость синхронных электродвигателей насосных агрегатов

Анализ эксплуатации синхронных электродвигателей, работающих в различных отраслях народного хозяйства страны, показывает, что для них характерны следующие динамические ре-

жимы: внезапный скачок нагрузки; полное и кратковременное отключение высоковольтной линии электропередачи и трансформатора; короткие замыкания.

Для синхронных электродвигателей насосных агрегатов наиболее характерный динамический режим — кратковременное снижение напряжения питающей электрической сети из-за коротких замыканий на высоковольтных линиях электропередачи с последующим их отключением. Причиной кратковременного снижения напряжения также может быть внезапное включение в сеть соизмеримой с насосной станцией другой нагрузки, пуск одного или одновременно нескольких насосных агрегатов.

Основная задача моделирования на ЭВМ динамической устойчивости синхронного электродвигателя насосного агрегата заключается в определении характера и величины изменения напряжения на шинах насосной станции, после кратковременного снижения напряжения питающей электрической сети без АРВ, с релейной форсировкой возбуждения и с АРВ пропорционального и сильного действия.

Моделирование динамической устойчивости синхронных электродвигателей насосных агрегатов проводим на примере насосной станции Шерабад, где установлены шесть электродвигателей типа ВДСО-325/69—16 с $P_n = 7,5$ мВт, $U_n = 10$ кВ, $I_{сн} = 505$ А, $I_{ин} = 375$ А, $n = 375$ об/мин и осевые насосы типа ОП10-185. Электроэнергия подается высоковольтной линией ВЛ-220 кВ от подстанции Денау, расположенной на расстоянии 77,2 км и на шинах которой напряжение поддерживается постоянным. На подстанции Шерабад-насосная установлены два понижающих автотрансформатора типа АТДЦТГН 63000/230/121±10×1,0%/10 кВ.

Схема замещения электрической сети строится в предположении, что сопротивление проводов в линиях электропередачи не зависит от температуры окружающей среды и параметров режима. Это позволяет построить схему замещения электрической сети такой, в которой токи и напряжения связаны линейными уравнениями.

В схеме электрической сети несколько уровней напряжения, поэтому приведем их к единым базисным условиям: напряжение $U_6 = 230$ кВ, мощность $S_6 = 100$ мВА и сопротивление $z_6 = S_6 / U_6^2$.

В схеме замещения электрической сети (рис. 47) приводятся параметры линии электропередачи и понижающих автотрансформаторов. Все синхронные электродвигатели сведены к одному эквивалентному, параметры которого приведены ниже.

Параметры эквивалентного синхронного электродвигателя

	Обозначение и размерность	Величина
Синхронное сопротивление по продольной оси	x_d , о. е.	0,22
Синхронное сопротивление по поперечной оси	x_q , о. е.	0,1375

Переходное сопротивление по продольной оси	x'_d , о. е.	0,0515
Сверхпереходное сопротивление по продольной оси	x''_d , о. е.	0,0962
Сверхпереходное сопротивление по поперечной оси	x''_q , о. е.	0,03
Взаимное индуктивное сопротивление по продольной оси	x_{ad} , о. е.	0,197
Взаимное индуктивное сопротивление по поперечной оси	x_{aq} , о. е.	0,114
Реактивное сопротивление обмотки возбуждения	x_f , о. е.	0,23
Активное сопротивление обмотки возбуждения	r_f , о. е.	0,00104
Активное сопротивление обмотки возбуждения с разрядным сопротивлением	r_{fk} , о. е.	0,00278
Реактивное сопротивление демпферной обмотки по продольной оси	x_{kd} , о. е.	0,024
Реактивное сопротивление демпферной обмотки по поперечной оси	x_{kq} , о. е.	0,018
Активное сопротивление демпферной обмотки по продольной оси	r_{kd} , о. е.	0,0067
Активное сопротивление демпферной обмотки по поперечной оси	r_{kq} , о. е.	0,00534
Отношение короткого замыкания	OKЗ	0,895
Постоянная времени обмотки возбуждения	T_{d0} , с.	2,89
Переходная постоянная времени обмотки статора по продольной оси	T'_d , с	0,678
Сверхпереходная постоянная времени обмотки статора по продольной оси	T''_d , с	0,0249
Переходная и сверхпереходная постоянная времени обмотки статора по поперечной оси	$T'_q = T''_q$, с	0,079
Постоянная времени возбудителя	T_v , с	0,1

При моделировании динамической устойчивости синхронных электродвигателей насосных агрегатов возникает необходимость решения дифференциальных уравнений переходных процессов. Начальные условия при решении этих уравнений определяются расчетом нормального режима работы электродвигателей и электрической сети.

Результаты расчета нормального режима, а также расчетная схема замещения, приведенная к базисным условиям, даны на рис. 48.

Рассмотрим динамическую устойчивость синхронного электродвигателя насосного агрегата при трехфазном коротком замыкании на нагрузке, питаемой от одного узла с электродвигателями (рис. 49), без АРВ, с релейной форсировкой возбуждения и с АРВ пропорционального и сильного действия.

При моделировании использована разработанная во Всесоюзном научно-исследовательском институте электроэнергетики (ВНИИЭ) программа расчета динамической устойчивости сложных энергосистем [55].

Известно, что при трехфазном коротком замыкании резко снижается уровень напряжения питающей электрической сети, на-

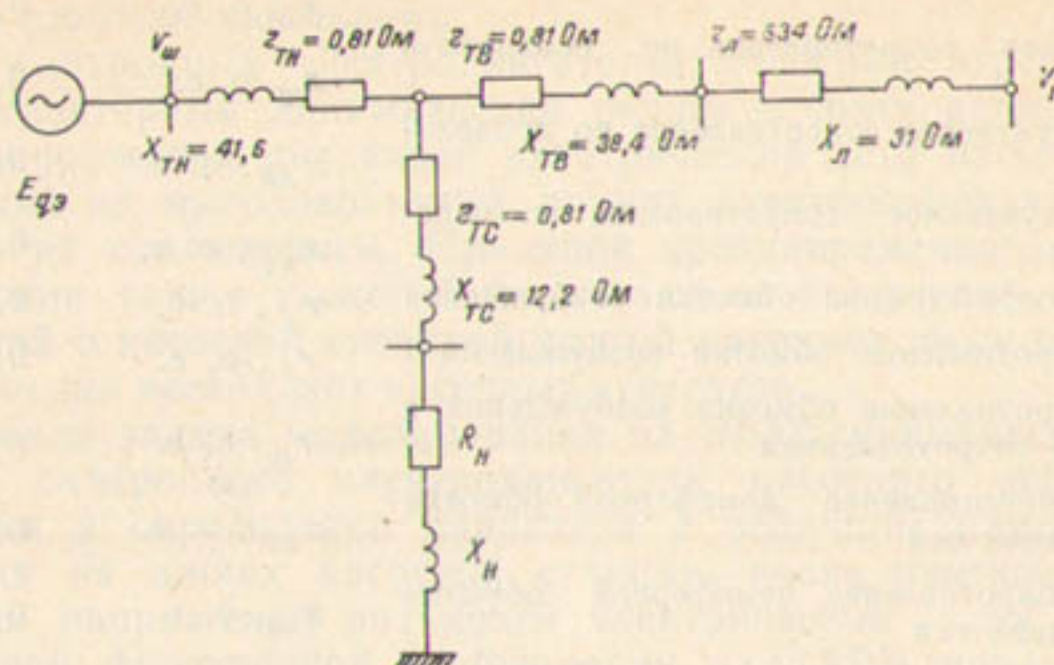


Рис. 47. Схема замещения с учетом параметров линии электропередачи и понижающих автотрансформаторов.

рушается нормальный режим эксплуатации синхронных электродвигателей и их поведение описывается полной системой урав-

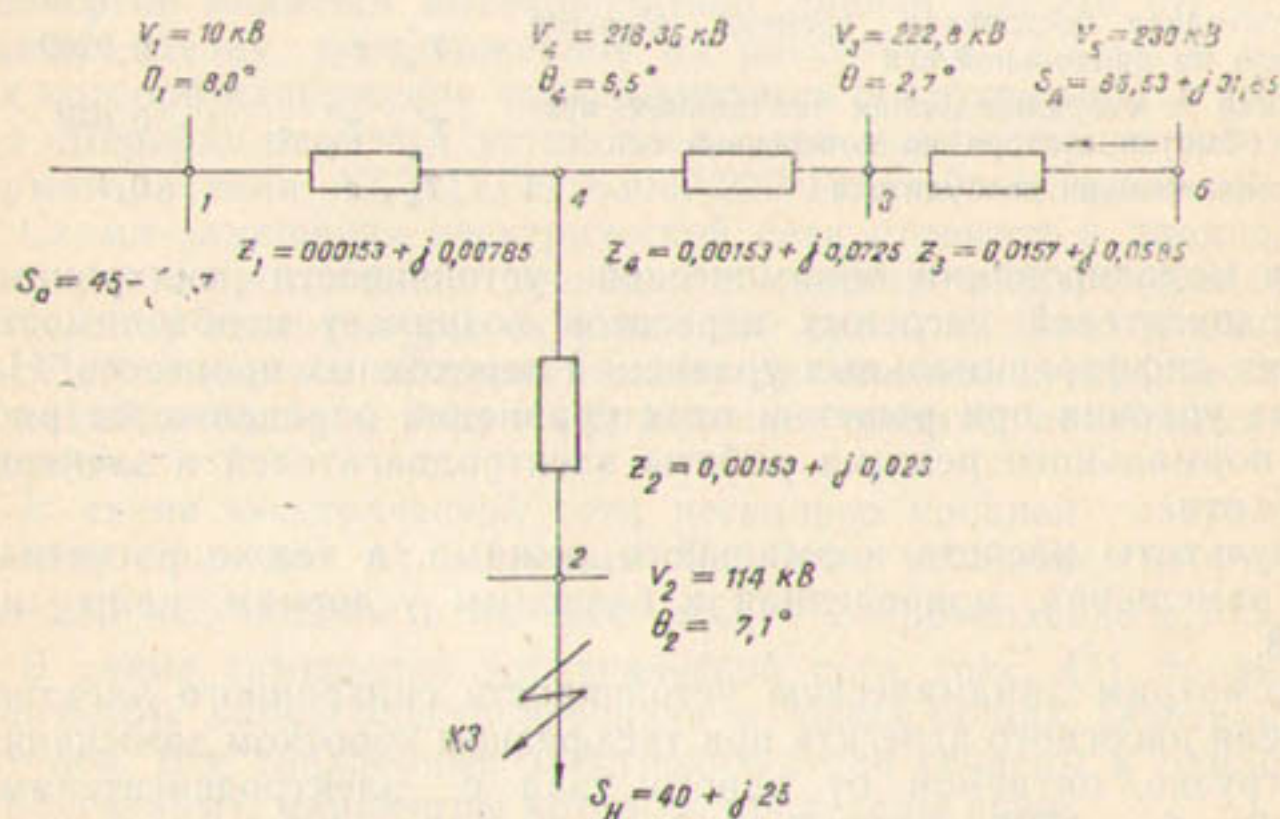


Рис. 48. Схема замещения, приведенная к базисным условиям, с результатами расчета нормального режима.

нений Парка-Горева. Используемая программа расчета реализует упрощенную систему уравнений Парка-Горева, в которой не учитываются трансформаторные ЭДС и ЭДС-скольжения.

Принятые уравнения синхронного электродвигателя имеют следующий вид:

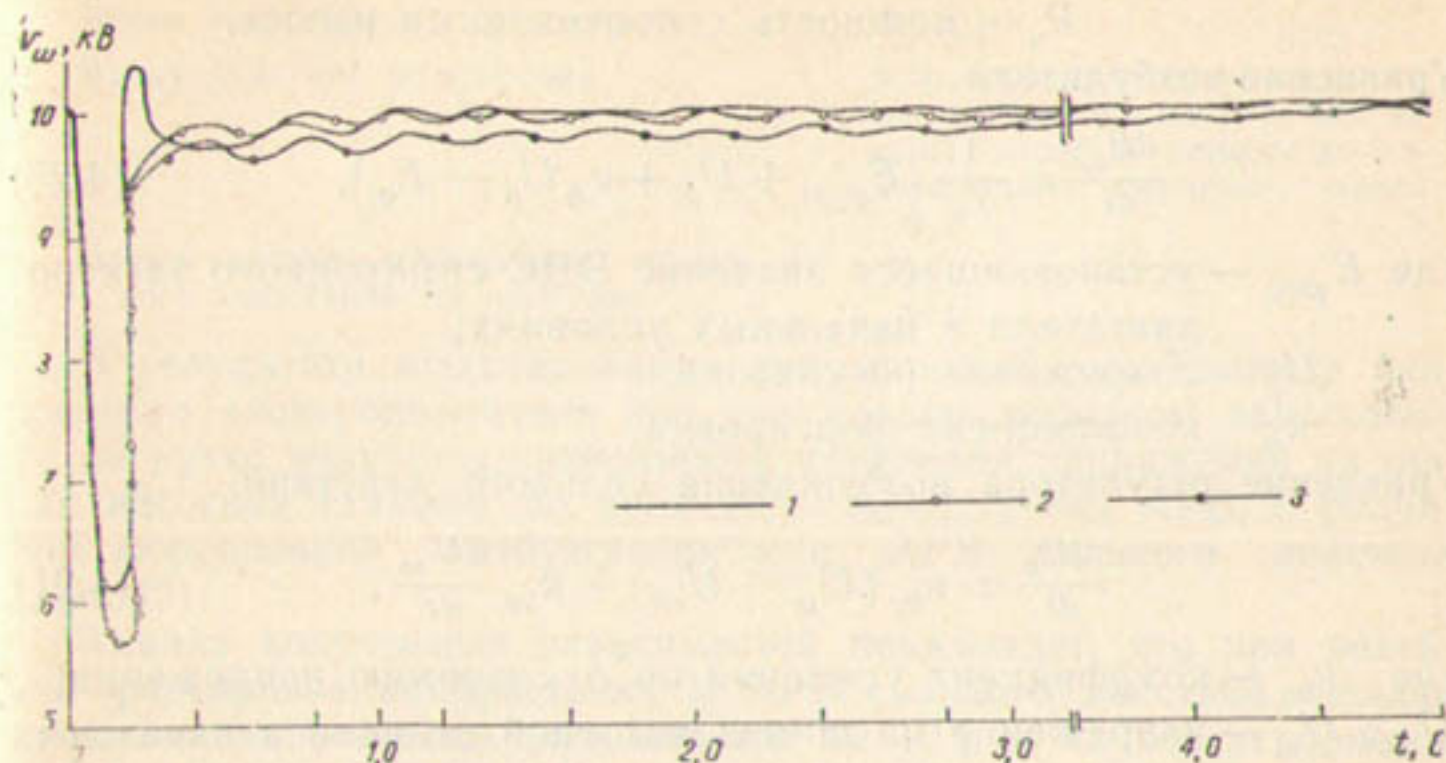


Рис. 49. Изменение напряжения на шинах насосной станции Шерабад при кратковременном снижении напряжения питающей электрической сети с различным регулированием возбуждения синхронных электродвигателей насосных агрегатов:

1—с форсировкой возбуждения и АРВ сильного действия, 2—с форсировкой возбуждения без АРВ, 3—без форсировки и без АРВ.

$$\left. \begin{aligned}
 U_d &= I_q x_q, \\
 U_q &= E'_q - x'_d I_d, \\
 \frac{dE'_d}{dt} &= \frac{1}{T'_q} [(x_q - x'_d) I_q - E'_d], \\
 \frac{dE'_q}{dt} &= \frac{1}{T'_{d0}} [E_{q0} - E'_q - (x_d - x'_d) I_d], \\
 \frac{ds}{dt} &= \frac{\omega_0}{T_j S_n} (P_\lambda + D \cdot S - P_n), \\
 P_\lambda &= E'_q I_q + E'_d I_d, \\
 Q_\lambda &= E'_q I_d - E'_d I_q,
 \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

где

E'_d, E'_q — ЭДС за переходной реактивностью;
 E_q — установившееся значение ЭДС в переходном режиме;
 s, ω_0 — скольжение и угловая скорость, рад/с;
 S_n — полная мощность электродвигателя;

$$D = \frac{U^2 (x_d - x_d^*)}{2x_d' x_d''} T_d^* - \text{коэффициент демпфирования};$$

P_n — мощность сопротивления насоса.

Уравнение возбудителя

$$\frac{dE_{q0}}{dt} = \frac{1}{T_v} (E_{q0(0)} + U_p + k_\phi U_6 - E_{q0}), \quad (4.20)$$

где $E_{q0(0)}$ — установившееся значение ЭДС синхронного электродвигателя в начальных условиях;

U_p — напряжение регулятора;

k_ϕ — коэффициент форсировки.

Уравнение регулятора возбуждения сильного действия.

$$\frac{dU_p}{dt} = k_{0v} (U_m - U_{m0}) + k_{1v} \frac{dU_m}{dt}, \quad (4.21)$$

где k_{0v} — коэффициент усиления по отклонению напряжения;

U_{m0} , U_m — напряжение на шинах насосной станции в начальных условиях и в переходном режиме;

k_{1v} — коэффициент усиления по первой производной напряжения.

Уравнения электрической сети и понижающих автотрансформаторов, согласно схеме замещения, между условными точками 3 и 4, 1 и 4 следующие:

$$\left. \begin{aligned} U_{d3} &= U_{d4} - r_3 I_{d3} + x_3 I_{q3}, \\ U_{q3} &= U_{q1} - r_3 I_{q3} - x_3 I_{d3}, \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{d1} &= U_{d4} - r_1 I_{d1} + x_1 I_{q1}, \\ U_{q1} &= U_{q4} - r_1 I_{q1} - x_1 I_{d1}, \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

Уравнения между остальными узловыми точками схемы замещения записываются аналогично.

Для численного интегрирования дифференциальных уравнений переходных процессов в программе расчета используется метод предсказывающе-корректирующий [27, 56].

Принятые параметры регулятора сильного действия приведены ниже:

	Обозначение и размерность	Величина
Постоянная времени регулятора	$T_p, \text{с}$	0,01
Коэффициент усиление по отклонению напряжения	k_{0v}	15
Коэффициент усиления по первой производной напряжения	k_{1v}	—5

Коэффициент демпфирования	$D, \text{MBA} \cdot \text{с}$	0,003
Уставка реле форсировки	$U_{\text{рф}}$	0,85
Время запаздывания форсировки	$t_{\text{ф. зап.}}, \text{с}$	0,05
Время действия форсировки	Форсировка отключается после восстановления напряжения на шинах насосной станции до номинального значения через 0,1 с.	
Время действия трехфазного короткого замыкания на нагрузке	$t_{\text{к.з.}}^{(3)}, \text{с}$	0,1

В результате моделирования динамической устойчивости синхронного электродвигателя при трехфазном коротком замыкании на нагрузке получены зависимости изменения напряжения на шинах насосной станции по времени — $V_{\text{ш}} = f(t)$ без АРВ, с релейной форсировкой возбуждения и с АРВ сильного действия (рис. 49).

Анализ полученных зависимостей показывает, что при релейной форсировке возбуждения и АРВ сильного действия степень снижения напряжения уменьшается на 10% и на 5 с ускоряется время восстановления напряжения на шинах насосной станции.

Таким образом, наличие системы АРВ сильного действия синхронных электродвигателей насосных агрегатов, настроенного на поддержание напряжения на шинах насосной станции, снижает степень и время восстановления напряжения питающей электрической сети при резком его снижении. Этим улучшается эксплуатация не только синхронных электродвигателей насосных агрегатов, но и других потребителей данного узла нагрузки энергосистемы.

Глава V. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ СИСТЕМ МАШИННОГО ВОДОПОДЪЕМА

К вопросу рассмотрения объектов систем машинного водоподъема как единой системы канал — насосная станция — электрическая сеть

Объекты систем машинного водоподъема — подводящие и отводящие каналы, насосные станции и питающие электрические сети — взаимосвязаны технологически. Для пуска насосного агрегата необходимо, чтобы уровень нижнего бьефа насосной станции был высоким. В этом случае уменьшается статический напор насосной станции, что улучшает условия пуска насосного агрегата.

Колебания уровней верхнего и нижнего бьефов насосной станции влияют на режим работы синхронного электродвигателя насосного агрегата, так как колебания статического напора насосной станции меняют нагрузку на валу насосного агрегата [64], особенно если отсутствует АРВ двигателя.

Проведенные нами исследования показывают, что в настоящее время в большинстве крупных и средних насосных станций синхронные электродвигатели эксплуатируются без АРВ [64]. Если меняется нагрузка на валу насосного агрегата при отсутствии АРВ, то синхронный электродвигатель работает в различных режимах. Так, увеличение нагрузки на валу насосного агрегата при постоянстве возбуждения приводит к тому, что синхронный двигатель из режима перевозбуждения (выдача реактивной мощности в питающую электрическую сеть) переходит в режим недовозбуждения (потребление реактивной мощности из питающей электрической сети), что существенно влияет на режим работы питающей электрической сети. При эксплуатации синхронных электродвигателей в режиме недовозбуждения уровень напряжения в электрической сети понижается, что ухудшает условия асинхронного пуска насосного агрегата [5].

Таким образом, режим эксплуатации канала влияет на режим работы питающей электрической сети, который, в свою очередь, воздействует на режим работы синхронного электродвигателя насосного агрегата и наоборот.

В связи со сказанным возникает необходимость исследования объектов системы машинного водоподъема — подводящий и отводящий каналы, насосную станцию и питающую электрическую сеть — как единую систему канал — насосная станция — электрическая сеть (рис. 50).

Использование методов системного анализа в рассматриваемой задаче даст полную картину взаимосвязи составляющих

системы канал — насосная станция — электрическая сеть. Основная задача такой системы — поддерживать заданный график водоподдачи при различных изменениях режимов работы составляющих системы с минимальными энергозатратами.

Резервы снижения энергозатрат имеются у всех составляющих системы. В подводящих и отводящих каналах минимальные затраты можно получить за счет ликвидации сбросов поднятой во-

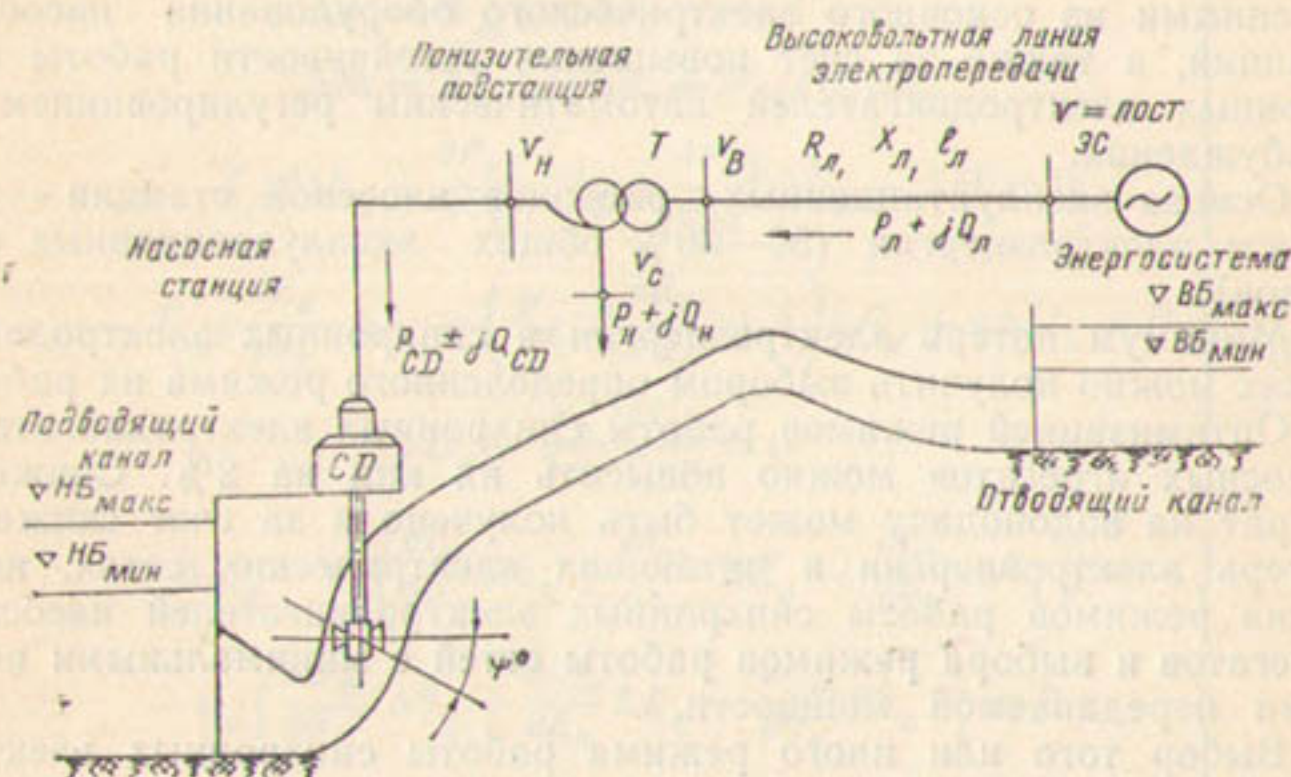


Рис. 50. Схема системы канал—насосная станция—электрическая сеть.

ды, снижения геометрической высоты качания, выбора режимов работы каналов и насосных станций, обеспечивающих максимально возможный общий кпд системы в широком диапазоне режимов водоподдачи.

В лаборатории эксплуатации насосных станций и водоподъемных машин САНИИРИ результаты исследования режима работы подводящих и отводящих каналов на примере каскада насосных станций Каршинского магистрального канала показали, что в зависимости от режимов работы каналов выигрыш в кпд составляет от 2 до 10%.

Насосные станции с регулируемыми (осевыми) насосами позволяют свести до минимума потери энергии в насосных агрегатах за счет благоприятного комбинирования углами разворота лопастей, числом работающих насосных агрегатов и поддержания соответствующих горизонтов в подводящих и отводящих каналах. Насосные станции с нерегулируемыми центробежными насосами обычно имеют параллельное включение нескольких насосных агрегатов, работающих на один трубопровод. В этом случае минимум энергозатрат при заданной подаче насосной станции обеспечивается оптимальной вариацией подключения насос-

ных агрегатов, а также поддержанием соответствующих горизонтов в подводящих и отводящих каналах.

Например, в Московском энергетическом институте исследование оптимальных режимов работы насосных станций с осевыми насосами позволило повысить кпд насоса на 3%.

Минимальные затраты на насосной станции возможны также за счет снижения потерь электроэнергии в синхронных электродвигателях, которые являются наиболее мощными и ответственными из основного электрического оборудования насосных станций, а также за счет повышения устойчивости работы синхронных электродвигателей автоматическим регулированием их возбуждения.

Основа эксплуатационных расходов насосной станции — стоимость электроэнергии (50—60% общих эксплуатационных расходов).

Минимум потерь электроэнергии в синхронных электродвигателях можно получить выбором определенного режима их работы.

Оптимизацией режимов работы синхронных электродвигателей насосных агрегатов можно повысить их кпд на 2%. Снижение затрат на водоподачу может быть получено и за счет снижения потерь электроэнергии в питающих электрических сетях, изменения режимов работы синхронных электродвигателей насосных агрегатов и выбора режимов работы сетей с минимальными потерями передаваемой мощности.

Выбор того или иного режима работы синхронных электродвигателей насосных станций влияет на потери электроэнергии в питающей электрической сети. Проведенные нами исследования на примере питающей электрической сети насосной станции Шерабад показали, что изменением режимов работы синхронных электродвигателей можно повысить кпд электрической сети на 3%.

Таким образом, оптимизация режимов работы системы канал—насосная станция—электрическая сеть за счет повышения кпд составляющих системы на объектах машинного водоподъема можно получить значительный экономический эффект. Разработана математическая модель и структурная схема составляющих системы канал—насосная станция—электрическая сеть.

На основе уравнений составляющих системы при малых отклонениях переменных (3.32), (3.63) получена полная система уравнений всей системы

$$\Delta h_1 = W_1^1(p) \Delta p_1 + W_2^1(p) \Delta p_3$$

$$\Delta p_1 = \Delta a_1 + \Delta f_1$$

$$\Delta p_3 = \Delta q_1 + \Delta q + \Delta q_2$$

$$\begin{aligned}
\Delta f &= W_1(p) \cdot \Delta h_1 \\
\Delta h_2 &= W_1^2(p) \Delta p_3 + W_2^2(p) \Delta p_2, \\
\Delta p_2 &= \Delta a_2 + \Delta f_2, \\
\Delta f_2 &= W_2(p) \Delta h_2, \\
\Delta q_1 &= W_{n3}(p) \Delta h_1, \\
\Delta q_2 &= W_{n4}(p) \Delta h_2 \\
\Delta M &= W_{n1}(p) \Delta h_1 + W_{n2}(p) \Delta h_2 \\
T_j p^2 \Delta \theta_\Sigma + \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_\Sigma} \Delta \theta_\Sigma + \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial E_d} \Delta E_d - \Delta M &= 0 \\
T_{d_0} p \frac{\partial E_d}{\partial \theta_\Sigma} \Delta \theta_\Sigma + \left(T_{d_0} p \frac{\partial E_d}{\partial E_d} + 1 \right) \Delta E_d + \kappa \Delta U_v &= 0 \\
\Delta U_v - \frac{\kappa_v \cdot \Delta U_p}{1 + T_v p} &= 0 \\
\Delta U_p - \kappa_l \left(\frac{\partial I_{cr}}{\partial \theta_q} \Delta \theta_\Sigma + \frac{\partial I_{cr}}{\partial E_d} \Delta E_d - \frac{\partial I_{cr}}{\partial \theta_a} \Delta \theta_a \right) - \\
- \kappa_v \left(\frac{\partial U_{ш}}{\partial \theta_q} \Delta \theta_\Sigma + \frac{\partial U_{ш}}{\partial E_d} \Delta E_d - \frac{\partial U_{ш}}{\partial \theta_a} \Delta \theta_a \right) &= 0 \\
\frac{\partial P'_{q\Sigma}}{\partial \theta_a} \Delta \theta_\Sigma + \frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial E_d} \Delta E_d + \left(\frac{\partial P'_{q\Sigma}}{\partial U_{ш}} - \frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial U_{ш}} \right) \Delta U_{ш} - \\
- \left(\frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \theta_a} + \frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial \theta_a} \right) \Delta \theta_a &= 0. \\
\frac{\partial Q_a}{\partial \theta_a} \Delta \theta_\Sigma + \frac{\partial Q_g}{\partial E_d} \Delta E_d + \left(\frac{\partial Q_g}{\partial U_{ш}} - \frac{\partial Q_a}{\partial U_{ш}} \right) \Delta U_{ш} - \\
- \left(\frac{\partial Q_a}{\partial \theta_a} + \frac{\partial Q_g}{\partial \theta_g} \right) \Delta \theta_a &= 0.
\end{aligned} \tag{5.1}$$

При проведении исследований питающая электрическая сеть рассмотрена нами как объект с сосредоточенными параметрами, так как интерес представляют переходные процессы только на шинах насосной станции.

На основе системы уравнений (5.1) разработана полная структурная схема системы канал — насосная станция — электрическая сеть (рис. 51), которая состоит из отдельных структурных схем подводящего и отводящего каналов, насоса, синхронного электродвигателя с системой АРВ и питающей электрической сети.

Выражения передаточных функций структурной схемы имеют следующий вид:

$$W_1^1(p) = - \frac{L_1^1 p + K_1^1}{T_1^1 p + 1} \cdot \frac{\gamma_1^1}{x_2^1} e^{-\tau_1^1 \cdot p} N_n^1 ;$$

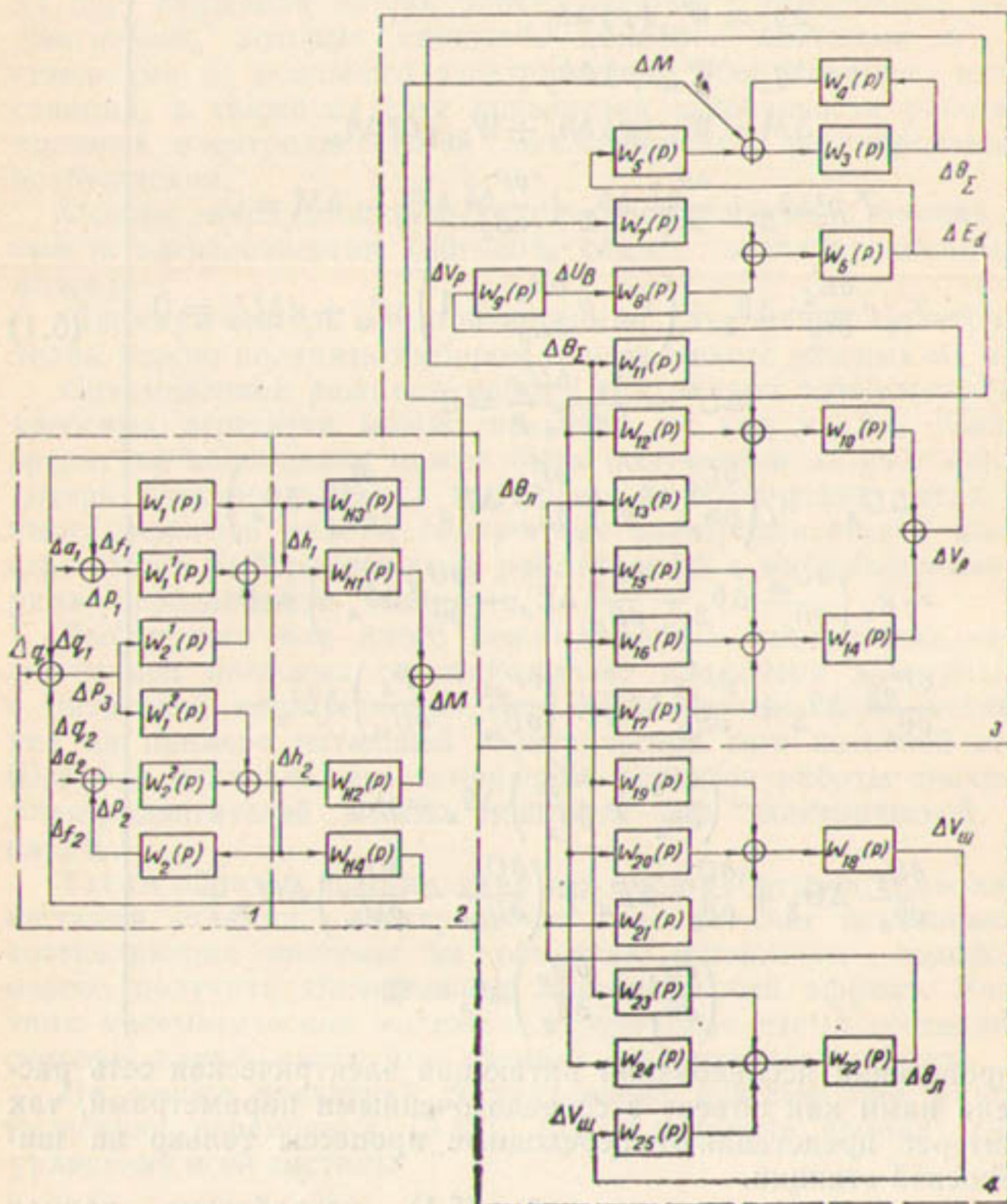


Рис. 51. Структурная схема системы канал—насосная станция—электрическая сеть.

Каналы: 1—подводящий и отводящий, 2—насос, 3—синхронный электродвигатель с системой АРВ; 4—питающая электрическая сеть.

$$W_2^1(p) = - \frac{L_4^1 p + K_4^1}{T_4^1 p + 1} \cdot \frac{\gamma_2^1}{x_1^1} N_k^1 ;$$

$$W_1^2(p) = -\frac{L_1^2 p + \kappa_1^2}{T_1^2 p + 1} \cdot \frac{\gamma_1^2}{x_2^2} N_n^2;$$

$$W_2^2(p) = -\frac{L_4^2 p + K_4^2}{T_4^2 p + 1} \cdot \frac{\gamma_2^2}{x_1^2} e^{-\gamma_2^2 p} \cdot N_k^2;$$

$$W_1(p) = \kappa_1; \quad W_2(p) = \kappa_2;$$

$$W_{n1}(p) = \frac{\partial M}{\partial \Delta h_1}; \quad W_{n2}(p) = \frac{\partial M}{\partial \Delta h_2};$$

$$W_{n3}(p) = \frac{\partial [Q = f(H)]}{\partial \Delta h_1}; \quad W_{n4}(p) = \frac{\partial [Q = f(H)]}{\partial \Delta h_2};$$

$$W_3(p) = \frac{1}{T_j \cdot p^2}; \quad W_4(p) = -\frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial \Theta_{\Sigma}};$$

$$W_5(p) = -\frac{\partial P_{\Sigma}}{\partial E_d}; \quad W_6(p) = \frac{1}{T_{d0} \cdot p \frac{\partial E_d}{\partial E_d} + 1};$$

$$W_7(p) = -T_{d0} \cdot p \frac{\partial E_d}{\partial \Theta_{\Sigma}}; \quad W_8(p) = -\kappa;$$

$$W_9(p) = \frac{\kappa_b \Delta U_p}{1 + T_b \cdot p}; \quad W_{10}(p) = \kappa_I;$$

$$W_{11}(p) = \frac{\partial I_{CT}}{\partial \Theta_A}; \quad W_{12}(p) = \frac{\partial I_{CT}}{\partial E_d};$$

$$W_{13}(p) = \frac{\partial I_{CT}}{\partial \Theta_A}; \quad W_{14}(p) = \kappa_{\sigma};$$

$$W_{15}(p) = \frac{\partial U_{III}}{\partial \Theta_A}; \quad W_{16}(p) = \frac{\partial U_{III}}{\partial E_d};$$

$$W_{17}(p) = -\frac{\partial U_{III}}{\partial \Theta_A}; \quad W_{18}(p) = \frac{1}{\frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial U_{III}} - \frac{\partial P_A}{\partial U_{III}}};$$

$$W_{19}(p) = -\frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial \Theta_A}; \quad W_{20}(p) = -\frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial E_d};$$

$$W_{21}(p) = \frac{\partial P_A}{\partial \Theta_A} + \frac{\partial P'_{\Sigma}}{\partial \Theta_A}; \quad W_{22}(p) = \frac{1}{\frac{\partial Q_A}{\partial \Theta_A} + \frac{\partial Q_{\Sigma}}{\partial \Theta_A}};$$

$$W_{23}(p) = \frac{\partial Q_d}{\partial \theta_d}; \quad W_{24}(p) = \frac{\partial Q_d}{\partial E_d};$$

$$W_{25}(p) = \frac{\partial Q_d}{\partial U_{ш}} - \frac{\partial Q_d}{\partial U_{ш}};$$

Разработанные математическая модель и структурная схема системы канал — насосная станция — электрическая сеть позволяют определить оптимальные режимы работы их составляющих, выбрать оптимальные параметры регулирования и управления и т. д.

Выбор параметров оптимизации режимов работы системы канал — насосная станция — электрическая сеть

В результате изучения и исследования режимов работы составляющих системы канал — насосная станция — электрическая сеть выявлены их сравнительные особенности, так как они не идентичны и отличаются геометрическими параметрами и размерами, составом оборудования, имеют различные параметры управления и регулирования, отличаются особенностями эксплуатации. На основе выявленных особенностей составляющих системы определены параметры режимов, регулирования и управления каналом, насосной станцией и питающей электрической сетью.

Наличие сравнительных особенностей эксплуатации, параметров режимов, регулирования и управления составляющих системы позволило определить те параметры и состояния, которые присущи для всей системы (табл. 5).

На основе определенных параметров режимов, регулирования и управления выявлены параметры оптимизации и параметры стабилизации, по которым может осуществляться оптимизация режимов работы составляющих системы канал — насосная станция — электрическая сеть.

Подводящий и отводящий каналы. Эксплуатация подводящего канала в режиме повышенных наполнений (максимальная величина наполнения канала ограничивается условиями безаварийности, незаиляемости, испарения и фильтрации воды) позволяет уменьшить потери энергии на трение в широком диапазоне расходов, тем самым снизить суммарную геометрическую высоту подъема воды насосной станцией.

Отводящий канал должен эксплуатироваться в режиме пониженных наполнений (минимальная величина наполнения канала ограничивается условиями нормальной и безаварийной эксплуатации сифона напорного трубопровода и потерь энергии на трение) при этом снижается геометрическая высота подъема воды насосной станцией.

Величины наполнения подводящего и отводящего каналов характеризуются уровнями горизонтов воды в нижнем и верхнем бьефах насосной станции, которые показывают высоту подъема воды насосной станцией.

Таким образом, уровни горизонтов воды в нижнем и верхнем бьефах насосной станции определяют потери энергии на трение, потери воды на испарение и фильтрацию в подводящем и отводящем каналах, а также расход энергии на подъем воды насосной станцией. Поэтому для подводящего канала параметром оптимизации режимов работы служит уровень горизонта воды в нижнем бьефе насосной станции — $h_{нб}$.

Для отводящего канала уровень горизонта воды в верхнем бьефе насосной станции — $h_{вб}$. Остальные параметры режимов работы подводящего и отводящего каналов такие, как: продолжительность переходного процесса, скорость изменения уровней воды, скорость перемещения волны расхода, скорость изменения объема воды, величина открытия затвора перегораживающего сооружения, скорость перемещения затвора перегораживающего сооружения должны быть стабилизированы или ограничены, в зависимости от решаемой задачи.

Насосная станция. В насосных станциях с осевыми насосами за счет благоприятного комбинирования углами разворота лопастей можно свести к минимуму потери энергии в насосных агрегатах.

В насосных станциях с центробежными насосами этого можно добиться вариацией числа работающих насосных агрегатов.

Таким образом, одним из параметров оптимизации режимов работы насосной станции с осевыми насосами является угол разворота лопастей (φ), с центробежными насосами — число работающих насосных агрегатов (n).

Из вышеизложенного известно, что минимум потерь электроэнергии в синхронных двигателях насосных агрегатов можно получить выбором определенного режима их работы. Выбор того или иного режима работы синхронного электродвигателя зависит от величины тока возбуждения. При изменении величины тока возбуждения синхронного электродвигателя изменяется величина угла φ — между током статора и напряжением питающей сети, а также характер опережения или отставания векторов тока статора и напряжения сети. Следовательно, параметром оптимизации режимов работы синхронного двигателя насосного агрегата является угол φ или $\cos \varphi$, который определяет тот или иной режим работы синхронного двигателя насосного агрегата.

Остальные параметры режимов работы насосной станции, такие, как расход (Q), напор (H), а также ток статора ($I_{ст}$), активная (P) и реактивная (Q) мощности, угол нагрузки (θ) синхронного электродвигателя насосного агрегата должны быть стабилизированы или ограничены в зависимости от решаемой конкретной задачи.

Особенности эксплуатации и параметры режимов, регулирующие электрические

Составляющие системы	Особенности эксплуатации
Канал	Различная протяженность подводящих и отводящих каналов Эксплуатация при различных гидравлических режимах Наличие регулирующего водохранилища на трассе канала
Насосная станция	Колебания уровней верхнего и нижнего бьефа насосной станции Постоянное регулирование производительности насосной станции

Т а б л и ц а 5

лирования и управления составляющих системы канал—насосная станция—
ческая сеть

Параметры режимов, регулирования и управления	Параметры и состояние всей системы
Расход (Q_k) объем воды (W_k), уровень воды (глубина потока), (h_k) в канале	Наличие переходного процесса
Кривая свободной поверхности	Постоянное время переходного процесса
Изменение открытия или закрытия затвора	Время запаздывания начала переходного процесса: чистое инерционное
Скорость течения воды в канале (V_k)	Время регулирования
Скорость перемещения затвора (V_z)	Величина перерегулирования
Скорость изменения объема воды (V_w)	Установившееся отклонение
Изменение и скорость изменения уровней в подводящем и отводящем каналах	Характер затухания переходного процесса: монотонный апериодический колебательный автоколебательный
Отклонения (мин. и макс.) изменения уровней воды	Степень устойчивости: апериодическая устойчивость колебательная устойчивость
Скорость (мин. и макс.) изменения уровней воды	Неустойчивость системы: апериодическое нарушение устойчивости, колебательное нарушение устойчивости.
Скорость (мин. и макс.) перемещения волны расхода	Допустимое отклонение регулируемых параметров (статическая ошибка)
Продолжительность переходного процесса	Наибольшее отклонение регулируемых параметров (динамическая ошибка)
Угол разворота лопастей осевого насоса (ψ)	Статическая устойчивость системы (устойчивость в малом)
Количество центробежных насосов, параллельно работающих на один трубопровод (n)	Динамическая устойчивость системы (устойчивость в большом)

Составляющие системы	Особенности эксплуатации
Насосная станция	Пониженное напряжение питающей электрической сети Отдаленность насосной станции от энергосистемы Совместная работа синхронного двигателя насосного агрегата с сельхозпотребителями, имеющими низкий коэффициент мощности Ступенчатый характер графика энергопотребления насосной станции Большой удельный вес затрат на электроэнергию от общих эксплуатационных Эксплуатация гидромеханического и электрического оборудования в течение года при резких колебаниях температуры окружающей среды
Электрическая сеть	Длинные линии электропередачи, питающие насосные станции. Наличие потребителей, имеющих различную нагрузку (активную, индуктивную и емкостную). Соизмеримость мощности электрической сети с мощностью насосной станции.

Параметры режимов, регулирования и управления	Параметры и состояния всей системы
Мощность сопротивления насоса (P_n)	Необходимость автоматизированной системы управления и регулирования с оптимизацией ее параметров
Расход (Q_n), напор (H_n) и число оборотов ($n_{об}$) насоса	
Полная ($S_{сд}$), активная ($P_{сд}$), реактивная ($Q_{сд}$) мощность синхронного двигателя	
Напряжение (U), ток статора ($I_{ст}$), внутренний угол (θ), число оборотов (n) и ток возбуждения (I_v) синхронного двигателя	
Мощность (P_v) и напряжение возбуждения (U_v) возбудителя синхронного двигателя, а также коэффициент усиления по напряжению возбудителя (K_v)	
Э. д. с. синхронного двигателя в установившемся режиме (E_{d0}), в переходном режиме (E_d) и за переходной реактивностью (E'_d)	
Постоянная инерции (T_j), постоянная времени обмотки возбуждения синхронного двигателя при разомкнутой обмотке статора (T_{d0}), при замкнутой обмотке статора (T'_d)	
Постоянная времени обмотки возбуждения возбудителя синхронного двигателя (T_v)	
Напряжение сети и его производные	
Ток статора синхронного двигателя и его производные	
Активная и реактивная составляющие тока статора и их производные	
Внутренний угол (θ_d) и его производные	
Угол между током статора и напряжением сети (φ)	
Передаваемая полная (S_d), активная (P_d) и реактивная (Q_d) мощности	
Напряжение сети (U_c) и ток (I_c)	
Угол нагрузки линии электропередачи (θ_d)	

Составляющие системы	Особенности эксплуатации
Электрическая сеть	Различные режимы эксплуатации по передаваемой мощности

Электрическая сеть. Известно, что выбором режимов работы питающих электрических сетей можно достичь минимальных потерь передаваемой мощности. Потери активной и реактивной мощности зависят от величины напряжения питающей электрической сети при постоянстве его параметров и передаваемой мощности. Подбором значений напряжений в узлах нагрузки питающей электрической сети, от которых питаются насосные станции, можно добиться значительного снижения потерь активной и реактивной мощности, передаваемой по линии электропередачи.

Таким образом, параметром оптимизации режимов работы питающей электрической сети является величина напряжения в узлах нагрузки, от которых питаются насосные станции.

В результате проведенных исследований выбраны наиболее существенные параметры оптимизации режимов работы составляющих системы канал — насосная станция — электрическая сеть, по которым можно осуществлять основную задачу системы — поддержание заданного графика водоподдачи при минимальных энергозатратах.

Математическая постановка и формализация задачи оптимального управления объектами систем машинного водоподъема

Ниже приведен обзор ряда работ, посвященных задачам оптимизации режимов работы и оптимальному управлению объектов систем машинного водоподъема.

В [66] рассмотрен оптимальный режим работы насосных станций, оснащенных осевыми насосами. Решена задача оптимизации режимов работы насосных станций в определенный отрезок времени с заданным расходом, в которой как минимальная принимается мощность, потребляемая насосной станцией из питающей электрической сети. Поставленная задача сведена к минимизации функционала вида

$$F = \sum_{i=0}^n N_i(Q_i) + \lambda \varphi = \min, \quad (5.2)$$

Параметры режимов, регулирования и управления	Параметры и состояние всей системы
Продолжительность переходного процесса	
Напряжение и ток сети и их производные	
Угол нагрузки линии и его производные	

где $N_i(Q)$ — мощность насосной станции при постоянной величине напора;

λ — постоянный множитель Лагранжа;

$\varphi = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n - Q_{ст} = 0$ — интегральная сумма расходов насосных агрегатов.

Условие оптимального режима работы насосной станции по условию минимума затрат энергии на перекачку воды имеет вид

$$\frac{\partial N_1}{\partial Q_1} = \frac{\partial N_2}{\partial Q_2} = \dots = \frac{\partial N_n}{\partial Q_n} \quad (5.3)$$

Условием минимума функционала (5.2) будет положительный знак второй производной

$$\frac{\partial^2 N}{\partial Q^2} > 0. \quad (5.4)$$

В [67] рассмотрено применение дискретного принципа максимума для оптимизации режимов работы насосных агрегатов станций с центробежными насосами. В [68] определено оптимальное количество включенных насосных агрегатов, их состав и распределение по ним плановой производительности насосной станции.

Оптимизационная модель задачи имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i \in L} N_i(Q_i) &\rightarrow \min, \\ \sum_{i \in L} Q_i &= Q_c, \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

где L — множество из $l \leq m$ элементов, представляющих собой номера насосных агрегатов.

Целевая функция (5.5) применительна к условиям постоянства напора насосной станции. В общем случае мощность насосной станции зависит от расхода и напора

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i \in L} N_i(Q_i, H_i) &\rightarrow \min, \\ Q_i &\in \{0, [Q_i^{\min}, Q_i^{\max}]\}, i \in L \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

Использован основной принцип блочного программирования, задача разделена на две части: поиск оптимального распределения плановой подачи по насосным агрегатам для заданного их количества и состава; сопоставление между собой всех возможных для насосных станций вариантов решения первой части задачи и выбор наиболее экономичного с точки зрения потребления мощности.

В [69] рассмотрена задача оптимального управления водораспределением в типовом элементе каскада насосная станция — гидротехническое сооружение — гидротехническое сооружение. Задача оптимального управления сформулирована так: требуется обеспечить минимум потерь воды и минимум переключений двигателей насосов при выполнении плановых заявок водопотребителей, ограничении колебаний уровней воды в нижних бьефах перегораживающих сооружений и в верхнем бьефе в пределах призмы регулирования. Эта задача решена на основе принципа векторной (многокритериальной) оптимизации.

Эффективность управления оценена с помощью векторного критерия

$$I = (I_1, I_2), \quad (5.7)$$

где $I_1 = \sum_{t=1}^M [Q(L, t+1) - v_6(t+1)] \tau$ — потери воды в конце канала;

$$I_2 = \sum_{i=1}^{R_0} \lambda_i n_i \text{ — износ двигателей насосов;}$$

τ — длина дискретных интервалов управления;

n_i — число переключений i -го интервала;

λ_i — коэффициент износа, пропорциональный мощности i -го двигателя;

R_0 — число управляемых насосов;

t — время;

Q — расход в канале;

L — длина канала;

v_6 — плановый отбор воды в конце канала.

Требуется определить такие последовательности управлений $\bar{u}(t) \in U$, $t=1, 2, \dots, m$, которые удовлетворяют условиям Парето при векторном критерии (5.7) и соответствующим ограничениям, описывающим динамику с учетом векторов планов отбора воды, а также ограничений на уровни воды канала

$$h_1(x) \leq h(x, t) \leq h_2(x), \quad (5.8)$$

где x — сечение канала.

Для численного решения уравнений динамики канал разбит по длине на ряд призматических участков, интервал просчета состояний $\tau=6$ мин выбран из условия допустимой точности аппроксимации уравнений динамики. Однако, значение вектора управления $U(t)$ практически может измениться через гораздо больший интервал времени. Это обусловлено техническими характеристиками электродвигателей насосных агрегатов, а также тем временем, которое затрачивает диспетчер на контроль состояния объекта. В работе изменение управлений проводилось через $\tau=4$ ч.

В связи с этим критерий I_1 представим в следующем виде

$$I_1 = \sum_{t=1}^m I_1^{(t)}, \quad (5.9)$$

где

$$I_1^{(t)} = \sum_{j=\kappa_1(t-1)}^{\kappa_1 t-1} [Q(L, j+1) v_b(j+1)] \tau, \quad \kappa_1 = \lceil \tau_1/\tau \rceil = 40$$

характеризует потери воды в конце канала за время τ_1 .

При наличии двух противоречивых критериев I_2 и (5.9) задача дискретного управления сводится к отысканию множества эффективных в смысле Парето последовательностей управления $\{\bar{U}(t)^* \in U, t=1, 2, \dots, m$, которые предлагаются диспетчеру для выбора окончательного решения. Для определения эффективных последовательностей управлений использовался метод параметрических ограничений [69]. Решение двухкритериальной задачи управления с помощью этого метода заключается в том, что она представляется как однокритериальная задача минимизации функционала (5.9) при соответствующих ограничениях и дополнительных параметрических ограничениях на

$$I_2 = C, \quad C \in [0, C_{\max}], \quad (5.10)$$

где $C_{\max}$ — характеризует износ электродвигателей в зависимости от числа их переключений.

Для решения данной однокритериальной задачи управления использован эвристический алгоритм поиска оптимальных управлений, основанный на принципе самоорганизации [69].

Задаваясь различными ограничениями типа равенств на второй критерий I_2 , удовлетворяющими условию (5.10) и, решая мно-

гократно задачу синтеза управлений с помощью приведенного алгоритма, получим ряд последовательностей управлений.

В [70] решена задача оптимального управления гидроэнергетическими сооружениями (гидроэлектростанциями, гидроаккумулирующими электростанциями и насосными станциями) с учетом неустановившегося движения воды в каналах.

Задачи управления сводятся к поиску такого режима работы гидросооружений, при котором достигается минимум функционала, выражающего затраты потребителей на электроэнергию либо затраты в энергосистеме на ее производство за рассматриваемое время

$$I = \int_0^T N[a(t), P] dt \quad (5.11)$$

где N — затраты в единицу времени;

$a(t)$ — известная функция времени, отражающая неравномерность графика нагрузки энергосистемы;

P — мощность гидроэнергетического сооружения, характеризующая режим его работы и зависящая от параметров потока в его бьефах.

Задача управления формулируется как вариационная задача отыскания минимума функционала затрат при наличии ограничений и решается методом неопределенных множителей Лагранжа, алгоритм решения задачи приведен в [71].

Рассмотрен длинный горизонтальный канал без трения с прямоугольным сечением русла, ограниченный справа насосной станцией, т. е. рассмотрен типовой участок насосная станция — канал.

Затраты на подачу воды из канала за время T определяются следующим образом

$$I = \int_0^T N(U, H, a) dt, \quad (5.12)$$

где N — функция, зависящая от мощностной характеристики насосной станции и стоимостной функции;

$U = Q(0, t)$ — расход насосной станции в момент времени $t = 0$;

H — глубина потока;

a — стоимость единицы электроэнергии, потребляемой насосной станцией.

За время T насосная станция должна перекачать определенный объем воды, так что должно выполняться условие

$$\int_0^T U d(t) = \text{const.} \quad (5.13)$$

При постоянной стоимостной функции и постоянном режиме работы условие (5.13) удовлетворяется таким образом, что за-

траты на перекачку воды минимальны. При переменной стоимостной функции этого можно добиться, выбирая определенный режим работы насосной станции.

Длина канала принята такой, что возмущения, вызванные изменениями режима работы насосной станции, за время T не достигают левого конца канала. Сформулирована вариационная

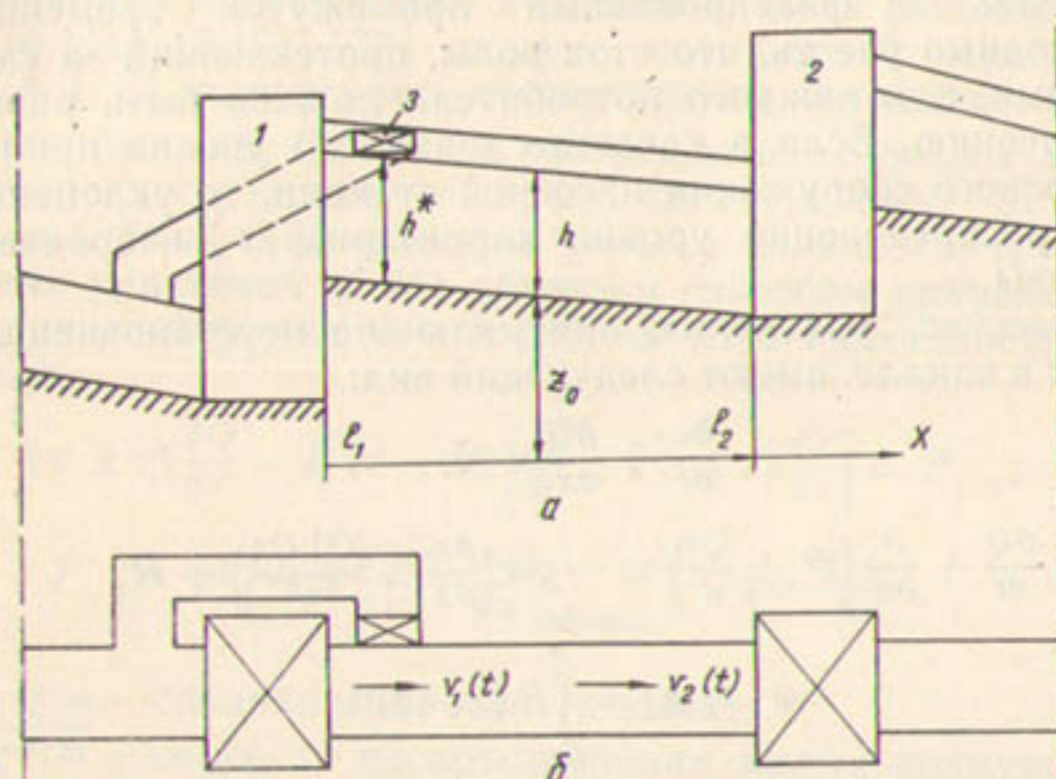


Рис. 52. Схема участка канала, ограниченного двумя насосными станциями.
1, 2—насосные станции, 3—сброс.

задача: необходимо найти функцию U доставляющей экстремум функционалу (5.12) при наличии уравнений, описывающих движение воды, и изопериметрическом условии (5.13).

Проведенный обзор показывает, что в [66—68] рассматривается только отдельно взятая насосная станция или типовой элемент каскада типа насосная станция—канал [70, 71]. Только в [69] рассматривается задача оптимального управления водораспределением в типовом элементе каскада насосная станция—гидротехническое сооружение—гидротехническое сооружение.

Таким образом, в работах, посвященных решению задач оптимального управления объектами систем машинного водоподъема, предлагается движение воды установившимся, либо рассматривается канал, ограниченный одним гидротехническим сооружением или насосной станцией, или каскад другого, нежели в наших случаях, типа с различными критериями оптимизации. И самое главное, во всех случаях не учитываются параметры и режимы работы питающих электрических сетей, а это, как было сказано выше, также влияет на энергозатраты на подъем воды насосной станцией.

Рассмотрим задачу оптимального управления процессом водораспределения на участке канала с произвольным сечением

где функции N_i описывают мощностные характеристики насосных станций, $a(t)$ — стоимостная функция электроэнергии.

Требуется определить функции управления $U_i(t)$ ($i=1, 2$; $t_0 \leq t \leq T$) таким образом, чтобы минимизировать положительный функционал:

$$I = I_1 + I_2. \quad (5.21)$$

Формализация задачи:

$$I = \int_{l_1}^{l_2} \int_{t_0}^T (h(x, t) - h^*(x))^2 dx dt + \\ + \sum_{i=1}^2 K_i \int_0^T N_i(U_i(t), h(l_i, t), a(t)) dt \rightarrow \inf, \quad (5.22)$$

$$\int_{t_0}^T U_i(t) dt = W_i; \quad U_i(t_0) = U_{i1}, \quad U_i(T) = U_{i2} \quad (i=1, 2). \quad (5.23)$$

Здесь W_i , U_{i1} , U_{i2} — заданные числа; $U_i(t) \in V$, V — множество простых конечнозначных функций на интервале $[t_0, T]$, причем таких, что $A_1 \leq U_i(t) \leq A_2$ (физический смысл положительных постоянных A_1 и A_2 состоит в том, что они характеризуют максимальную и минимальную пропускную способность участка канала).

$h(x, t)$ — решение краевой задачи (5.14) — (5.16), соответствующее управлению $U = U(t) = (U_1(t), U_2(t)) \in L_2^2[t_0, T]^*$.

Для решения задачи оптимального управления применим метод разностной аппроксимации [75].

Разобьем отрезок $[t_0, T]$ на K частей точками

$$\{t_k; k = \overline{0, K}, t_0 < t_1 < \dots < t_{K-1} < t_K = T\},$$

а отрезок $[l_1, l_2]$ на N частей точками $\{x_n; n = \overline{0, N}, l_1 = x_0 < \dots < x_{N-1} < x_N = l_2\}$.

Примем эти точки в качестве узловых точек разностной сетки.

В результате минимизируемый функционал примет следующий вид:

$$I_K([U]_K^t) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{N-1} (h(x_n, t_k) - h^*(x_n))^2 \tau \Delta + \\ + \sum_{i=1}^2 \sum_{k=0}^{K-1} N_i([U]_K^t, h_i(l_i, t_k), a_i(t_k)) \tau, \quad (5.24)$$

где τ — шаг по оси t , Δ — по оси x .

* $L_2[t_0, T]$ — пространство суммируемых с квадратом функций на интервале $[t_0, T]$.

Далее уравнения (5.18) аппроксимируем с помощью абсолютно устойчивой неявной разностной схемы, имеющей второй порядок аппроксимации по x и первый по t . В результате получим систему линейных уравнений вида

$$A_n U_{n+1}^{k+1} + B_n U_n^{k+1} - A_n U_{n-1}^{k+1} = D_n, \quad (n = \overline{1, N-1}), \quad (5.25)$$

где

$$A_n = \frac{\tau}{2\Delta} (\Lambda S)_n^k;$$

$$B_n = S_n^k - \tau \left(\frac{\partial F}{\partial U} \right)_n^k;$$

$$D_n = \left[S_n^k - \tau \left(\frac{\partial F}{\partial U} \right)_n^k \right] U_n^k + \tau F_n^k;$$

$$\frac{\partial F}{\partial U} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial Q} & \frac{\partial F_1}{\partial z} \\ \frac{\partial F_2}{\partial Q} & \frac{\partial F_2}{\partial z} \end{pmatrix}.$$

Здесь шаги τ — по оси t и Δ — по оси x приняты постоянными.

Кроме уравнений (5.25), на концах рассматриваемого участка, используем разностные граничные условия.

Для первого уравнения системы (5.18) производим аппроксимацию, полагая $n=0$, для второго аппроксимируем при $n=N$.

Получим уравнения вида

$$2A_0^{(1)} U_1^{k+1} + [B_0^{(1)} - 2A_0^{(1)}] U_0^{k+1} = D_0^{(1)}, \quad (5.26)$$

$$[B_N^{(2)} + 2A_N^{(2)}] U_N^{k+1} - 2A_N^{(2)} U_{N-1}^{k+1} = D_N^{(2)}, \quad (5.27)$$

где индексы (1) и (2) указывают, что рассматривается первая и вторая строки матриц A , B и вектора-столбца D .

Уравнения (5.25) — (5.27) вместе с условиями (5.15), (5.16) образуют замкнутую систему алгебраических уравнений относительно неизвестных U_n^{k+1} ($n = \overline{0, N}$).

Рассмотрим уравнение $U = [U_1(t), U_2(t)]$.

Имеем

$$[U]_k \in V_k = \{ [U]_k = (U_0^1, U_1^1, \dots, U_{k-1}^1, U_k^1, U_0^2, U_1^2, \dots, U_{k-1}^2); \\ U_k^i = U_k^i(t_k) \in V, \quad i = 1, 2; \quad k = \overline{0, k-1} \}. \quad (5.28)$$

Здесь V — множество простых конечнозначных функций, удовлетворяющих соотношениям (5.28) и $A_1 \leq U_i(t) \leq A_2$.

Таким образом, задаче (5.22), (5.23) при ограничениях (5.14) — (5.16), рассматриваемой в пространстве $L_2^2[t_0, T]$ при каждом

$k \geq 1$ и разбиении $(t_k; \overline{k=1, k})$ отрезка $[t_0, T]$, соответствует дискретная задача оптимального управления (5.24) — (5.28) в пространстве L_{2k}^2 .

Можно показать, что последовательность решений дискретных аппроксимационных задач сходится к решению исходной задачи при $N, K \rightarrow \infty$.

Решая систему уравнений (5.25) — (5.27) с условиями (5.15) и (5.16) и подставляя полученные решения в (5.24), мы можем вычислить значение минимизируемого функционала для любых заданных наборов управлений $\{U_i(t)\}$.

Остановимся на решении дискретной экстремальной задачи (5.24) — (5.28). Функционал $I_k(\{U\}_k)$ является непрерывной функцией от U , поэтому для решения этой задачи наиболее целесообразен метод прямого поиска [76].

Пусть на m -ой интеграции получена вектор-функция $U_m(t) = (U_m^1(t), U_m^2(t))$ (напомним, что для каждого m $U_m(t)$ — конечная простая неотрицательная функция).

Генерируются J псевдослучайных чисел r_j ($j = \overline{1, J}$) на интервале $(-\alpha, \alpha)$ ($0 < \alpha < 1$) и рассматривается множество управлений $\{U_j(t)\}$ ($j = \overline{1, J}$) таких, что

$$U_j(t) = U_m(t) + r_j f_m(t), \quad (5.29)$$

где $f_m(t) \in V$ для всех m и $\int_0^t f_m(t) dt = 0$ [см. (5.28)].

Далее, среди управлений $U_j(t)$ ($j = \overline{1, J}$) выбираем то, для которого значение функционала (5.24) является наименьшим. Обозначим его через $U_{m+1}(t)$. Оно будет новым приближением к точке экстремума. Затем находится новый набор случайных чисел и т. д.

Критерий остановки может быть основан на текущих результатах счета. Например, счет может быть прекращен на $m+1$ -ом шаге, если $|I^{m+1} - I| < \delta$, где $\delta > 0$ — заданное число, а I^{m+1} — значение функционала, соответствующее управлению $U_{m+1}(t)$.

Необходимо отметить, что здесь приведена одна из возможных математических постановок задачи оптимального управления процессом водораспределения на участке канала, ограниченного двумя насосными станциями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное состояние управления системами машинного водоподъема указывает на необходимость совершенствования его на базе средств вычислительной техники и автоматизации. Существенное улучшение управления системами машинного водоподъема возможно при эксплуатации их в составе разрабатываемых в последние годы АСУ ВХК. Проведенные исследования, результаты которых отражены в монографии, необходимы при разработке АСУ ВХК с системами машинного водоподъема.

Разработаны технологические основы управления системами машинного водоподъема, которые заключаются в основных технологических положениях по выбору режимов работы подводящих и отводящих каналов, осевых и центробежных насосов, насосных станций и питающих электрических сетей.

Определена технологическая взаимосвязь объектов систем машинного водоподъема: подводящего и отводящего каналов и насосной станции, синхронного электродвигателя насосного агрегата и питающей электрической сети.

Изменение режимов работы каналов влияет на режимы работы синхронного электродвигателя и питающей электрической сети и наоборот.

Разработаны математические модели и структурные схемы объектов системы машинного водоподъема и системы в целом.

Проведено математическое моделирование объектов системы машинного водоподъема с целью выбора САР бьефов каналов, возбуждения и определения устойчивости синхронного электродвигателя насосного агрегата.

При функционировании систем машинного водоподъема в составе АСУ ВХК возникает необходимость решения задач оптимального управления объектами системы, поэтому нами разработаны математическая постановка, формализация задач и алгоритм оптимального управления каскада, состоящего из двух насосных станций.

Технологическая взаимосвязь объектов систем машинного водоподъема обосновывает необходимость исследования их как единой системы канал — насосная станция — электрическая сеть. Наилучшие технико-экономические показатели система канал — насосная станция — электрическая сеть будет иметь при оптимальном управлении по заданным критериям.

Поэтому задачами дальнейших исследований являются разработка методов, математических моделей и алгоритмов оптимального управления системой канал — насосная станция — электрическая сеть.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маковский Э. Э. Автоматизация гидротехнических сооружений в системах каскадного регулирования расходов воды.— Фрунзе: Илим, 1972. 302 с.
2. Усманов Р. А. Результаты натурных исследований насосной станции «Хамза-1».— В кн.: Научные труды САНИИРИ. Вып. 142. Ташкент, 1974, с. 13—25.
3. Насосы осевые типа «О», «ОП» и центробежные вертикальные типа «В».— Каталог-справочник. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1970. 30 с.
4. Нормы и технические условия проектирования оросительных систем.— М.: Гипроводхоз, 1966. 125 с.
5. Хамудханов М. З., Хусанов М. А., Рахимов Ш. Х. Влияние понижения напряжения сети на пусковые характеристики синхронного двигателя осевого насоса.— Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук, 1972, № 2, с. 14—17.
6. Рахимов Ш. Х., Бедрина Е. Е. К выбору схемы пуска синхронного электродвигателя осевого насоса.— Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук, 1984, № 5, с. 37—40.
7. Домбровский В. В., Хуторецкий Г. М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: Энергия, 1974. 504 с.
8. Чилинин М. Г. Общий курс электропривода. М.: Энергия, 1971. 472 с.
9. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей.— М.: Госэнергоиздат, 1963. 528 с.
10. Аршеневский Н. Н., Поспелов Б. Б. Переходные процессы крупных насосных станций.— М.: Энергия, 1980. 111 с.
11. Захаров О. В. [и др.]. Опыт эксплуатации крупных осевых насосов на магистральных каналах.— Гидротехническое строительство, 1976, № 8, с. 41—44.
12. Карелин В. Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах.— М.: Машиностроение, 1975. 355 с.
13. Натурные исследования насосных агрегатов с водовыпусками, оборудованными гидравлическими устройствами для срыва вакуума. М., 1978. 324 с.
14. Васильев О. Ф. [и др.]. Численный метод расчета распространения длинных волн в открытых руслах и приложение его к задаче о паводке.— Докл. АН СССР, 1963, т. 151, № 3, с. 525—527.
15. Фильц Р. В. Определение зависимости компенсирующей способности синхронного двигателя от напряжения.— Изв. вузов СССР. Энергетика, 1972, № 10, с. 35—40.
16. Хусанов М. А., Рахимов Ш. Х. Влияние снижения напряжения сети на реактивную мощность синхронных двигателей насосных станций открытых оросительных систем.— В кн.: Научные труды САНИИРИ. Вып. 141. Ташкент, 1974, с. 126—130.
17. Рахимов Ш. Х. Влияние режимов работы синхронных двигателей крупных насосных станций на показатели электрической сети.— Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук, 1975, № 1, с. 89—90.
18. Бобер А. Г. Исследование эффективности использования насосных станций орошения в качестве потребителей-регуляторов и источников реак-

тивной мощности в энергосистемах.— Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Кишинев, 1971.

19. Глазунов А. А. Электрические сети и системы.— М.: Госэнергоиздат, 1972. 575 с.
20. Петелин Д. П. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей.— М.: Госэнергоиздат, 1961. 104 с.
21. Петелин Д. П. Автоматическое управление синхронными электроприводами.— М.: Энергия, 1968. 193 с.
22. Глебов И. А., Логинов С. И. Системы возбуждения и регулирования синхронных двигателей.— Л.: Энергия, 1972. 113 с.
23. Rogowski A., Vogel G. Generatorerregung mit Stromrichtern.— A. J. M., 1963, N 1, p. 21—26.
24. Baggal A. L'excitation des grandes machines synchrones par redresseurs a Vapeur de mercure.— A. J. M., 1963, N 1, p. 39—43.
25. Тиканди В. Н. Разработка и исследование системы автоматического регулирования возбуждения синхронного электропривода нефтепромысловых глубинно-насосных установок.— Автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Баку, 1969. 23 с.
26. Кулизаде К. Н., Али-Заде П. Г., Хайкин И. Е. Синхронный электропривод с пульсирующей нагрузкой.— М.: Энергия, 1978. 78 с.
27. Лоханин Е. К., Васильева Г. В. Исходные положения предсказывающе-корректирующего метода численного решения уравнений переходных процессов в сложных энергетических системах.— Труды ВНИИЭ. Вып. 33. М.: Энергия, 1968, с. 40—50.
28. Лищенко А. И. Бесконтактные синхронные машины с автоматическим регулированием возбуждения.— Киев: Наукова думка, 1980. 223 с.
29. Иносов В. Л., Крутикова В. Е., Каменева В. А. Синхронные двигатели с возбуждением от полупроводниковых выпрямителей.— Киев: Гостехиздат, 1960. 126 с.
30. Large drushless synchronous motor.— Electrical Review, 3 January, 1964, p. 123—129.
31. Логинов С. И. Системы возбуждения синхронных двигателей.— Электротехника, 1966, № 6, с. 19—21.
32. Логинов С. И., Волченкова Ю. В. Бесщеточные системы возбуждения синхронных двигателей средней и большой мощности.— В кн.: Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных машин. М.: Наука, 1970, с. 27—31.
33. Логинов С. И. Техничко-экономическое сопоставление синхронных двигателей с различными системами возбуждения.— Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1963, № 7, с. 810—816.
34. Нейман З. Б., Пекне В. З., Моз Л. С. Крупные вертикальные электро-двигатели переменного тока.— М.: Энергия, 1974. 375 с.
35. Хусанов М. А., Рахимов Ш. Х. Системы автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей насосных станций.— Тез. докл. республ. конф. Ташкент, 1976, с. 52.
36. Хусанов М. А., Рахимов Ш. Х. Выбор тиристорных возбудительных установок для синхронных двигателей насосных станций.— В кн.: Научные труды САНИИРИ. Вып. 145. Ташкент, 1975, с. 144—151.
37. Всесоюзное совещание по автоматическому регулированию и системам возбуждения синхронных двигателей.— Электричество, 1964, № 7, с. 31—33.
38. Ипатенко Н. Р. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей средней мощности на постоянство коэффициента мощности. Брянск: БИТМ, 1974, 146 с.
39. Дадажанов А., Рахимов Ш. Х., Алиев А. Ш., Муминов К. К вопросу стабилизации коэффициента мощности синхронного двигателя насосного агрегата.— Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук, 1980, № 1, с. 36—38.
40. Хусанов М. А., Рахимов Ш. Х. Энергопоказатели насосных станций.— Сельское хозяйство Узбекистана, 1975, № 8, с. 23.

41. Костюк О. М. Результаты промышленной эксплуатации опытной партии автоматических регуляторов возбуждения мощных синхронных двигателей.— Реф. докл. конф. «Системы возбуждения и регулирования мощных электрических машин переменного тока». М.: (Информстандарт-электро), Минэнерго СССР, 1967, с. 51.
42. Боканов М. В., Космачев Н. У., Ильина Л. В. Автоматическое регулирование возбуждения синхронного двигателя с электромашиным возбуждением на постоянство коэффициента мощности.— Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1970, № 1, с. 34—38.
43. А. с. 235155 (СССР). Способ регулирования возбуждения синхронной машины./Круглый А. А.— Оpubл. в Б. И., 1969, № 5.
44. Толстов Ю. Г., Мосткова Г. П., Ковалев Ф. И. Силовые полупроводниковые выпрямители, управляемые дросселями насыщения.— М.: Наука, 1968. 259 с.
45. Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. II, М.: Госэнергоиздат, 1963. 254 с.
46. Гольденберг Л. М. Импульсные устройства.— М.: Радио и связь, 1981. 222 с.
47. Кононов Б. Н. Симметричные триггеры на плоских полупроводниковых триодах.— М.: Госэнергоиздат, 1960. 160 с.
48. Рахимов Ш. Х. Разработка структурной схемы системы «канал — насосная станция — электрическая сеть».— В кн.: Научные труды САНИИРИ. Вып. 170. Ташкент, 1983, с. 117—125.
49. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах.— М.: Высшая школа, 1978. 415 с.
50. Мееров М. В. Введение в динамику автоматического регулирования электрических машин.— М.: Наука, 1956. 418 с.
51. Айзерман М. А. Теория автоматического регулирования.— М.: Наука, 1966. 452 с.
52. Хусанов М. А., Рахимов Ш. Х. Статическая устойчивость синхронного двигателя насосного агрегата с автоматическим регулированием возбуждения.— Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук, 1977 № 1 с. 25—29.
53. Веников В. А., Герценберг Г. Р., Совалов С. А., Соколов Н. И. Сильное регулирование возбуждения.— М.: Госэнергоиздат, 1963. 152 с.
54. Михневич Г. В. Синтез структуры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных машин.— М.: Наука, 1964. 232 с.
55. Разработка комплексной программы расчета статической и динамической устойчивости сложной энергосистемы на ЦВМ М-220. М.: ВНИИЭ, 1970. 278 с.
56. Лахонин Е. К., Васильева Г. В. Применение методов численного анализа к исследованию уравнений переходных процессов в сложных энергетических системах.— Труды ВНИИЭ. Вып. 33. М.: Энергия, 1968, с. 19—39.
57. Картвелишвили Н. А. Регулирование речного стока.— Л.: Гидрометеиздат, 1970. 218 с.
58. Васильев О. Ф., Атавин А. А., Воеводин А. Ф. Методы расчета неустановившихся течений в системах открытых русл и каналов.— В кн.: Численные методы механики сплошной среды.— Новосибирск: СОА АН СССР, 1975, с. 21—30.
59. Маковский Э. Э., Волчкова В. В. Автоматизация процессов трансформации неравномерного стока воды.— Фрунзе: Илим, 1977. 216 с.
60. Кадыров А. А., Бобров Ю. И. Исследование динамики функционирования оросительных систем с машинным водоподъемом топологическим методом.— Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук, 1981, № 6, с. 44—49.
61. Рахимов Ш. Х., Бегимов И. Выбор системы автоматического регулирования бьефов машинных каналов.— Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук, 1982, № 5, с. 44—50.
62. Бегимов И. К анализу систем автоматического регулирования уровня воды в ирригационных каналах.— Автоматика и телемеханика, 1981, № 9, с. 5—12.

63. Рахимов Ш. Х., Бегимов И., Касымбеков А. С. Выбор системы автоматического регулирования бьефов типового элемента каскада «насосная станция — гидротехническое сооружение — насосная станция». — Сб. трудов САНИИРИ. Вып. 170. Ташкент, 1983, с. 85—94.
64. Рахимов Ш. Х. Автоматическое регулирование синхронных двигателей насосных агрегатов гидротехнических сооружений. — Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. — Ташкент, 1978.
65. Рахимов Ш. Х. Выбор параметров оптимизации режимов работы системы «канал — насосная станция — электрическая сеть». — Сб. трудов САНИИРИ. Вып. 167. Ташкент, 1982, с. 141—149.
66. Климов В. Е. Оптимальный режим работы насосных станций, оснащенных осевыми насосами. — Гидротехника и мелиорация, 1970, № 11, с. 30—35.
67. Климов В. Е. Применение дискретного принципа максимума для оптимизации режимов работы насосных станций с нерегулируемыми агрегатами. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1972, № 3, с. 80—85.
68. Штабский Л. М., Балахнин В. Я. Выбор оптимального состава включенных насосов в условиях функционирования АСУ ТП. — Гидротехническое строительство, 1982, № 10, с. 15—17.
69. Коваленко П. И., Овчинников В. А., Акишин Б. А. Управление магистральными каналами как объектом с распределенными параметрами (на примере Каховской оросительной системы). — Гидротехника и мелиорация, 1978, № 3, с. 50—55.
70. Атанов Г. А., Воронин С. Т. Об одной вариационной задаче оптимального управления гидротехническими сооружениями. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1981, № 11, с. 69—71.
71. Атанов Г. А., Воронин С. Т. Об одной вариационной задаче гидродинамики открытых русл. — Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа, 1980, № 4, с. 159—163.
72. Рахимов Ш. Х., Шульга Д. Д., Бегимов И. Оптимальное управление процессом водораспределения в машинных каналах. — Сб. трудов САНИИРИ. Вып. 170. Ташкент, 1983, с. 15—22.
73. Рождественский Б. Л., Яненко Н. Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложения в газовой динамике. — М.: Наука, 1978. 687 с.
74. Воеводин А. Ф., Шугрин С. М. Численные методы расчета одномерных систем. — Новосибирск: СО АН СССР, 1981. 208 с.
75. Васильев Ф. П. Методы решения экстремальных задач. — М.: Наука, 1980. 518 с.
76. Гилл Ф., Мюррэй У. Численные методы условной оптимизации. — М.: Мир, 1977. 290 с.