

УТВЕРЖДАЮ
Директор ЭЛТИ



_____ А.П. Суржиков
«28» _____ мая _____ 2008 г.

ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Составители
Ю.Н. Дементьев, Б.В. Лукутин

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 621.31.031(076.5)

ББК 31.280.7я73

П64

П64 **Потребители электроэнергии и энергосбережение:** методические указания к выполнению лабораторных работ / сост.: Ю.Н. Дементьев, Б.В. Лукутин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 106 с.

ISBN 5-98298-193-1

УДК 621.31.031(076.5)

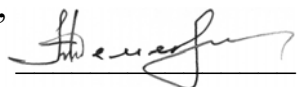
ББК 31.280.7я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры электропривода и электрооборудования «21» февраля 2008 г.

Зав. кафедрой ЭПЭО

кандидат технических наук,

доцент



Ю.Н. Дементьев

Председатель

учебно-методической комиссии



А.Н. Дудкин

Рецензент

Доктор технических наук,

профессор кафедры «Промышленная электроника» ТУСУРа

В.П. Обрусник

ISBN 5-98298-193-1 © Дементьев Ю.Н., Лукутин Б.В., составление, 2008

© Составление. Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа №1. Анализ графиков нагрузок по счетчикам активной и реактивной мощности	5
Лабораторная работа №2. Исследование управляемых выпрямителей.....	15
Лабораторная работа №3. Регулятор температуры с микропроцессорным управлением.....	27
Лабораторная работа №4. Исследование влияния отклонения напряжения на работу асинхронного двигателя.....	54
Лабораторная работа №5. Исследование зависимых инверторов	64
Лабораторная работа №6. Исследование систем плавного пуска асинхронных двигателей с тиристорными преобразователями напряжения	73
Лабораторная работа №7. Оценка качества напряжения в узлах нагрузки по отклонению напряжения	91

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Потребители электрической энергии» является одним из профилирующих курсов при подготовке бакалавров по образовательной программе «Электротехника» (Electrical Engineering), интегрирующей направления: 140600 – «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», 140200 – «Электроэнергетика». Он базируется на целом ряде предстоящих дисциплин, таких как «Силовые преобразователи энергии», «Электронная и микропроцессорная техника», «Электрический привод», «Электрические машины», «Электрические и электронные аппараты».

Изучение курса «Потребители электрической энергии» включает в себя, кроме теоретической части, еще и выполнение цикла лабораторно-практических занятий, целью которых является исследование режимов работы потребителей электроэнергии, принципов действия преобразователей электроэнергии, графиков активной и реактивной нагрузок. Особое внимание уделяется исследованию особенностей теплоинерционного объекта, способам регулирования температуры и скорости, методике оценки качества напряжения, которые являются частью технических мероприятий по энергосбережению. Работы проводятся на физических лабораторных установках, позволяющих смоделировать некоторые режимы работы потребителей электроэнергии.

Цикл лабораторно-практических занятий включает в себя семь работ:

1. Анализ графиков нагрузок по счетчикам активной и реактивной мощности.
2. Исследование управляемых выпрямителей.
3. Регулятор температуры с микропроцессорным управлением.
4. Исследование влияния отклонения напряжения на работу асинхронного двигателя
5. Исследование зависимых инверторов.
6. Исследование систем плавного пуска асинхронных двигателей с тиристорными преобразователями напряжения.
7. Оценка качества напряжения в узлах нагрузки по отклонению напряжения.

Возможности лабораторных стендов позволяют включать в лабораторные работы и элементы научных исследований.

Для подготовки к защите отчетов по лабораторным работам и самопроверке приводится перечень контрольных вопросов по каждой лабораторной работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

АНАЛИЗ ГРАФИКОВ НАГРУЗОК ПО СЧЕТЧИКАМ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

1.1. Цель работы

Овладение методикой опытного построения графиков нагрузок электротехнологических установок как потребителей электроэнергии, определение и анализ параметров и коэффициентов, характеризующих эти графики.

1.2. Теоретические сведения

Режимы работы потребителей электрической энергии не остаются постоянными, а непрерывно изменяются в течение суток, недель и месяцев года. Соответственно изменяется и нагрузка всех звеньев передачи и распределения электроэнергии и генераторов электрических станций. Изменение нагрузок электроустановок в течение времени принято изображать графически в виде графиков нагрузки.

Различают графики активных и реактивных нагрузок. По продолжительности графики нагрузки делятся на сменные, суточные и годовые.

В условиях эксплуатации изменения нагрузки по активной и реактивной мощности во времени представляют в виде ступенчатой кривой по показаниям счетчиков активной и реактивной мощности, снятым через одинаковые определенные интервалы времени (30 или 60 мин).

Знание графиков нагрузки позволяет определять величину сечений проводов и жил кабелей, оценивать потери напряжения, выбирать мощности генераторов электростанций, рассчитывать системы электропитания проектируемых предприятий, решать вопросы технико-экономического характера и многое другое.

По суточным графикам нагрузки строятся годовые графики. Различают два типа годовых графиков. Первый – график изменения суточных максимумов нагрузки. Он дает возможность правильно запланировать вывод электрооборудования в ремонт. Второй тип – график по продолжительности, который строится по двум характерным суточным графикам предприятия (за зимние и летние сутки). Годовые графики по продолжительности используются в технико-экономических расчетах (при

определении оптимального типа и мощности трансформаторов, генераторов станций, выборе вариантов электроснабжения и т. д.).

Графики нагрузок промышленных предприятий характеризуются следующими параметрами и коэффициентами:

1. P_M, Q_M, S_M – максимумы соответственно активной, реактивной и полной мощностей нагрузок.
2. $P_{см}, Q_{см}$ – средняя активная и реактивная нагрузки за наиболее загруженную смену.

$$P_{см} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}; \quad Q_{см} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n},$$

где P_i и Q_i – текущие значения активной и реактивной мощности за наиболее загруженную смену (максимально загруженной считается смена с максимальным расходом активной энергии); n – количество измерений.

3. $P_{ср}, Q_{ср}, S_{ср}$ – среднесуточные активная, реактивная и полная мощность нагрузки, соответственно. Определяются аналогично среднесменным, только для суток.
4. $K_{з.а}, K_{з.р}$ – коэффициенты заполнения графиков нагрузки активного и реактивного:

$$K_{з.а} = \frac{P_{см}}{P_M}; \quad K_{з.р} = \frac{Q_{см}}{Q_M}.$$

5. K_u – коэффициент использования установленной мощности потребителей. Обычно вычисляется для определенного промежутка времени:
 - для наиболее загруженной смены

$$K_{u.см} = \frac{P_{см}}{P_{уст}};$$

- для суток

$$K_u = \frac{P_{ср}}{P_{уст}},$$

где $P_{уст}$ – установленная мощность всех электроприемников, кВт.

6. K_M – коэффициент максимума нагрузки (определяется для наиболее загруженной смены)

$$K_M = \frac{P_M}{P_{см}}.$$

7. Средний за сутки коэффициент мощности

$$\cos\varphi_{ср} = \frac{P_{ср}}{\sqrt{P_{ср}^2 + Q_{ср}^2}}.$$

8. $P_э, Q_э, S_э$ – среднеквадратичные или эффективные активная, реактивная и полная нагрузки суточного графика:

$$P_э = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}}, \text{ кВт},$$

где P_1, P_2, \dots, P_n – средняя нагрузка на интервалах времени между замерами показаний приборов; t_1, t_2, \dots, t_n – временные интервалы между замерами.

Если интервалы между замерами одинаковы, то:

$$P_э = \sqrt{\frac{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + \dots + P_n^2}{n}}, \text{ кВт};$$

$$Q_э = \sqrt{\frac{Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 + \dots + Q_n^2}{n}}, \text{ кВар};$$

$$S_э = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_n^2}{n}}, \text{ кВ}\cdot\text{А},$$

где n – число измерений; $S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$, $S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2}$ и т.д.

9. $k_ф$ – коэффициент формы графика, который определяется как отношение среднеквадратичной мощности к средней за рассматриваемый период времени:

$$k_{ф.акт} = \frac{P_э}{P_{ср}}; \quad k_{ф.реакт} = \frac{Q_э}{Q_{ср}}; \quad k_ф = \frac{S_э}{S_{ср}}.$$

10. $T_м$ – число часов использования максимума активной нагрузки в год:

$$T_м = \frac{W_{а.г}}{P_м},$$

где $W_{а.г}$ – потребленная за год активная энергия, кВт·ч,

$$W_{а.г} = 365 \cdot (P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots + P_n \cdot t_n),$$

где P_1, P_2, \dots, P_n – средняя нагрузка на интервалах времени между замерами показаний приборов суточного графика нагрузки; t_1, t_2, \dots, t_n – временные интервалы между замерами.

11. α – коэффициент сменности,

$$\alpha = \frac{P_{ср.г}}{P_{см}},$$

где $P_{ср.г}$ – среднегодовая активная нагрузка,

$$P_{ср.г} = \frac{W_{а.г}}{8760}.$$

В настоящее время согласно действующему прейскуранту цен на электроэнергию № 09–01 применяются в основном две системы тарифов: одноставочный и двухставочный.

Под **тарифами** понимается система отпускных цен за электроэнергию, дифференцированных для различных групп потребителей.

Размеры тарифов устанавливаются региональными энергетическими комиссиями (РЭК).

Для **одноставочных тарифов** стоимость израсходованной электроэнергии, руб.,

$$C_{э} = bW_a,$$

где W_a – количество израсходованной предприятием электроэнергии, кВт·ч;
 b – тарифная ставка за 1 кВт·ч, руб/кВт·ч.

По одноставочному тарифу оплата производится промышленными предприятиями с присоединенной мощностью до 750 кВ·А.

Одноставочные тарифы являются наиболее простыми при расчетах за потребленную электроэнергию. Но они имеют некоторые недостатки: при отключении потребителя в какой-то промежуток времени потребитель не несет расходов за электроэнергию в этот период. Энергосистема же постоянно держит в рабочем состоянии генерирующие мощности с сопровождающимися при этом издержками энергетического производства.

Энергосистема осуществляет электроснабжение ряда промышленных и других потребителей. Соответственно, график нагрузки энергосистемы имеет явно выраженный дневной и вечерний максимумы.

Особое значение для энергосистемы имеют вопросы снижения электрической нагрузки предприятий в часы максимума энергосистемы (с 8 до 11 ч и с 17 до 22 ч).

При использовании одноставочных тарифов потребитель не стимулируется к выравниванию суточного графика нагрузки и к снижению токов нагрузки в часы максимума энергосистемы, так как оплачивает только потребленную электроэнергию независимо от кривой графика ее потребления. Но предприятие, оплачивающее электроэнергию по одноставочному тарифу, обязано оплатить в 4-кратном размере израсходованную сверх лимита электроэнергию.

Двухставочный тариф применяется для промышленных предприятий с присоединенной мощностью более 750 кВ·А. Двухставочный тариф состоит из основной и дополнительной ставок.

За основную ставку принимается годовая плата за 1 кВт присоединенной (договорной) максимальной 30-минутной мощности предприятия, участвующей в максимуме нагрузки ЭС. Дополнительная ставка

двухставочного тарифа предусматривает плату за израсходованную в киловатт-часах электроэнергию, учтенную счетчиками.

Стоимость электроэнергии по двухставочному тарифу, руб.:

$$C_3 = aP_m + bW_a,$$

где a – плата за 1 кВт заявленной (расчетной) мощности предприятия, участвующей в максимуме нагрузки энергосистемы, руб./г; b – стоимость 1 кВт·ч активной энергии по счетчику.

За нарушение договорных обязательств применяется система штрафов. За потребление сверхлимитной электроэнергии предприятие обязано оплатить надбавку в 6-кратном размере дополнительной ставки двухставочного тарифа. Превышение присоединенной мощности, заявленной в часы максимума энергосистемы, влечет за собой плату в 10-кратном размере основной ставки двухставочного тарифа за квартал, в котором произошло нарушение условий договора.

Кроме этого, энергосистема задает график работы компенсирующих устройств реактивной мощности, несоблюдение которого ведет к увеличению тарифа в размере 50 % за квартал, в котором отмечено нарушение этого графика.

В балансе реактивных нагрузок потери реактивной мощности в элементах системы электроснабжения промышленного предприятия достигают 20 %. Естественный коэффициент мощности электрических нагрузок различных промышленных предприятий изменяется в пределах $\cos\varphi_{\text{ест}} = 0,7-0,9$. Это означает, что предприятия потребляют реактивную мощность

$$Q_m = P_m \cdot \operatorname{tg}\varphi_{\text{ест}} = (1,02 - 0,48) P_m.$$

Полные затраты на производство и передачу всей необходимой предприятию реактивной мощности от шин электростанций в большинстве случаев значительно больше, чем затраты на производство реактивной мощности непосредственно в системе электроснабжения предприятия. Поэтому экономически целесообразно от генераторов электростанций передавать часть реактивной мощности, а *большую* – компенсировать на шинах присоединения предприятия к энергосистеме.

Согласно «Правилам пользования электрической и тепловой энергией» предусматривается нормирование потребления реактивной мощности непосредственно в именованных единицах, т. е. наряду с нормированием потребления активной мощности нормируется и реактивная.

Учитывая необходимость постоянного поддержания оптимальных режимов в энергосистеме, реактивная мощность предприятий нормируется для периода максимальной активной нагрузки энергосистемы $Q_{Э1}$ и для периода

минимальной нагрузки $Q_{Э2}$. Значения $Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$ рассчитываются энергоснабжающей организацией по специальной методике и на каждый квартал указываются в договоре с предприятием на пользование электрической энергией.

Оптимальное значение потребляемой из сетей энергосистемы реактивной мощности $Q_{Э1}$, задаваемое потребителю, определяет для него суммарную установленную мощность компенсирующих устройств.

1.3. Описание лабораторной установки

Лицевая панель лабораторной установки приведена на рис. 1.1.

Лабораторная установка позволяет моделировать 16 типовых графиков нагрузки промышленных предприятий:

- угледобывающий завод (вариант 1);
- нефтеперерабатывающий завод (вариант 2);
- торфоперерабатывающий завод (вариант 3);
- завод черной металлургии (вариант 4);
- завод цветной металлургии (вариант 5);
- химический завод (вариант 6);
- завод тяжелого машиностроения (вариант 7);
- ремонтно-механический завод (вариант 8);
- станкостроительный завод (вариант 9);
- автомобильный завод (вариант 10);
- деревообрабатывающий завод (вариант 11);
- целлюлозно-бумажный комбинат (вариант 12);
- комбинат легкой промышленности (вариант 13);
- прядильно-ткацкая фабрика (вариант 14);
- кирпичный завод (вариант 15);
- пищевой комбинат (вариант 16);

Номер варианта работы задается преподавателем. Включение лабораторной установки осуществляется автоматическим выключателем QF , расположенным в левой нижней части стенда. Кнопки «СТАРТ» и «СТОП» позволяют запускать и останавливать программное устройство по требованию, а кнопка «СБРОС» дает возможность возвращать установку на начало графика.

После нажатия кнопки «СТАРТ» программное устройство начинает автоматически отрабатывать заданный график нагрузки, при этом каждая ступень графика нагрузки выдерживается в течение 30 с, а затем следует переход на следующую ступень графика. Следовательно, весь суточный график моделируется за 12 мин. Ряд красных сигнальных ламп, расположенных вверху панели, позволяет видеть, какой шаг (ступень) графика нагрузки отрабатывается в данный момент моделью.

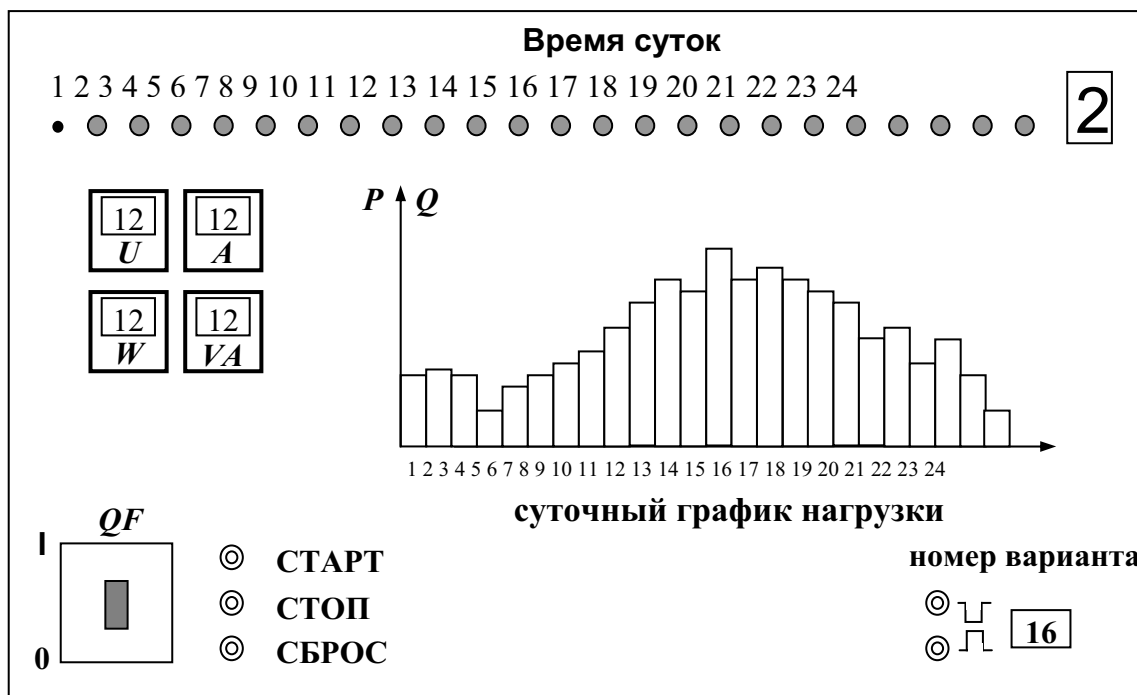


Рис. 1.1. Лицевая панель лабораторного стенда

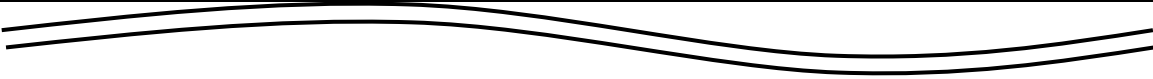
В левой части панели установлены измерительные приборы активной и реактивной мощности, по показаниям которых определяют нагрузку на каждом шаге графика. Вольтметр и амперметр показывают напряжение на нагрузке и полный ее ток.

1.4. Порядок выполнения работы

1. Включить автомат QF на лицевой панели. Кнопками выбора варианта, расположенными в правой нижней части панели, установить номер варианта, заданный преподавателем.
2. Нажатием кнопки «СТАРТ» приводим в действие программное устройство. При этом начинается последовательная отработка графика нагрузки, начиная с первого шага (часа) до последнего двадцать четвертого. Номер обрабатываемого шага графика контролируется сигнальными лампами в верхней части панели.
3. Зафиксировать показания измерительных приборов для каждого шага графика нагрузки. Снимаются следующие величины:
 - величина напряжения на шинах ГПП, кВ;
 - величина потребляемого предприятием тока на шинах ГПП, кА;
 - потребляемая предприятием активная мощность, МВт;
 - потребляемая предприятием реактивная мощность, МВар.
 Полученные данные заносятся в табл. 1.1

4. После окончания снятия экспериментальных данных, нажать кнопку «СТОП» и выключить автомат QF .

Таблица 1.1

t , час	U , кВ	I , А	P , МВт	Q , МВар
1				
2				
				
23				
24				

1.4.1. Последовательность обработки экспериментальных данных

- По полученным экспериментальным данным построить суточные графики активной и реактивной мощности.
- По суточным графикам нагрузки определить следующие показатели:
 - среднесуточную активную и реактивную нагрузку $P_{\text{ср}}, Q_{\text{ср}}$;
 - среднесменную нагрузку за наиболее загруженную смену $P_{\text{см}}, Q_{\text{см}}$;
 - максимальную активную и реактивную нагрузку $P_{\text{м}}, Q_{\text{м}}$;
 - коэффициент сменности α ;
 - коэффициенты заполнения активного и реактивного графиков нагрузки $K_{\text{з.а}}, K_{\text{з.р}}$;
 - коэффициент использования установленной мощности потребителей за наиболее загруженную смену $K_{\text{и}}$. Величину установленной мощности всех электроприемников предприятия принять по следующему выражению $P_{\text{уст}} = 3 \cdot P_{\text{м}}$;
 - коэффициент максимума нагрузки $K_{\text{м}}$;
 - средний за сутки коэффициент мощности $\cos \varphi$;
 - среднеквадратичные или эффективные значения активной, реактивной и полной нагрузки суточного графика $P_{\text{э}}, Q_{\text{э}}, S_{\text{э}}$;
 - коэффициент формы суточного графика по активной, реактивной и полной мощности $k_{\text{ф}}$.
- По суточному графику активной нагрузки построить годовой график активной нагрузки по продолжительности. Порядок построения графика следующий. На суточном графике нагрузки выделяется максимальная нагрузка и время ее действия в часах. Это время умножается на 365 (число дней в году) и величина максимальной нагрузки с найденной продолжительностью откладывается на годовом графике. Далее аналогично определяются следующие в порядке убывания значения нагрузок и их продолжительность из суточного графика и откладываются на годовом. Пример типового графика нагрузки по продолжительности приведен на рис. 1.2.

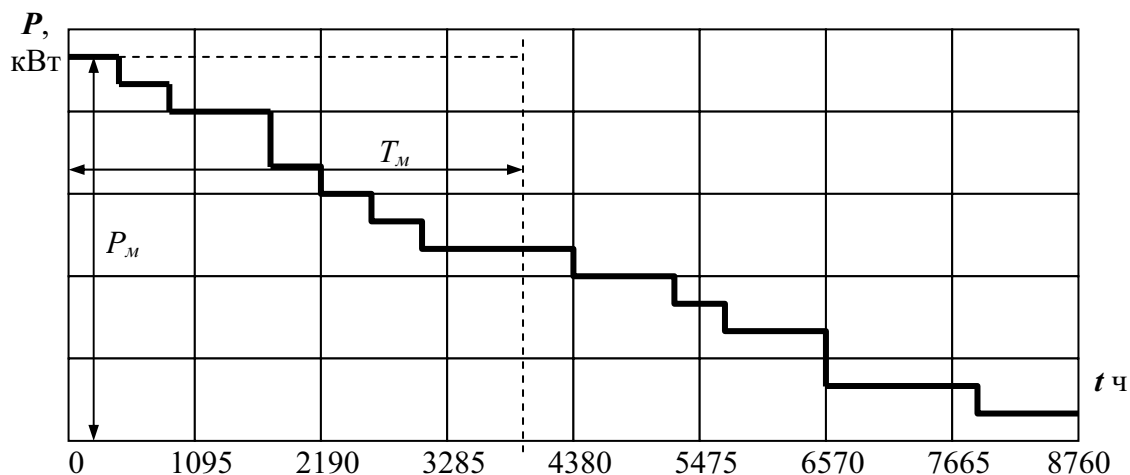


Рис. 1.2. Годовой график нагрузки по продолжительности

Площадь годового графика в определенном масштабе выражает количество потребленной промышленным предприятием электроэнергии за год. По годовому графику нагрузки можно определить число часов использования максимума нагрузки:

$$T_M = W_{a.g} / P_M,$$

где $W_{a.g}$ – годовой расход электроэнергии, кВт·ч; P_M – максимальная нагрузка, кВт.

4. Определить годовые затраты промышленного предприятия на электроэнергию при оплате по одноставочному и двухставочному тарифам.

Принять тарифную ставку за 1 кВт·ч потребленной электроэнергии, при оплате по одноставочному тарифу, равной $b = 1,0$ руб/кВт·ч.

При оплате по двухставочному тарифу плата за 1 кВт заявленной (расчетной) мощности предприятия, участвующей в максимуме нагрузки энергосистемы, равна $a = 100$ руб. за кВт/месяц; стоимость 1 кВт·ч активной энергии по счетчику составляет $b = 0,6$ руб/кВт·ч.

1.5. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы.
2. Заполненную таблицу экспериментальных данных.
3. Суточные графики активной и реактивной нагрузки.
4. Определение всех необходимых параметров и коэффициентов.
5. Годовой график по продолжительности для активной нагрузки.
6. Годовые затраты на электроэнергию.
7. Выводы.

1.6. Контрольные вопросы

1. С какой целью снимаются графики нагрузок на промышленных предприятиях?
2. Объясните понятие расчетной нагрузки.
3. Что такое коэффициент использования и для чего он определяется?
4. Дайте определение времени использования максимума нагрузки и укажите, какое значение имеет этот показатель в системах электроснабжения промышленных предприятий.
5. Какая смена считается наиболее загруженной?
6. Что характеризует каждый из коэффициентов графиков нагрузки?

1.7. Список литературы

1. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Мельников М.А. Внутрицеховое электроснабжение: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2002 – 143 с.
3. Волков Н.Г., Выблов А.Н., Даценко В.А., Кабышев А.В., Обухов С.Г. Электроснабжение промышленных предприятий: метод. указания к вып. лаб. работ. – Томск: Изд. ТПУ, 2003 – 93 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

2.1. Цель работы

Изучение принципа действия и основных характеристик управляемых выпрямителей, а также установление соотношений между их важнейшими параметрами.

2.2. Теоретические сведения

Выпрямитель называется управляемым, если он обеспечивает регулирование выходного напряжения в заданных пределах. На практике наибольшее распространение получили управляемые выпрямители с непосредственным воздействием на вентильные элементы схемы. В качестве управляемых вентилях в исследуемых схемах используются тиристоры. Простейшей схемой управляемого выпрямителя является однофазная однополупериодная схема (рис. 2.1, а).

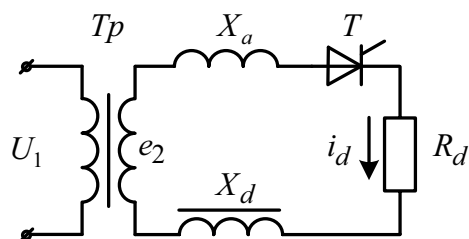


Рис. 2.1

На рис. 2.2, б представлены диаграммы тока и напряжения при чисто активной нагрузке и в предположении синусоидальности напряжения питания. Её отличие от диаграммы тока неуправляемого выпрямителя заключается в том, что начало протекания тока здесь задержано на угол запаздывания α , который называют углом управления. Выпрямленное напряжение изменяется по закону:

$$E_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} E_2 \sin \theta d\theta = \frac{\sqrt{2} E_2}{2\pi} (1 + \cos \alpha), \quad (2.1)$$

т.е. $E_{d\max} = \frac{\sqrt{2} E_2}{2\pi}$ при $\alpha = 0$ и $E_{d\min} = 0$ при $\alpha = \pi$.

Для случая активно-индуктивной нагрузки (рис. 2.2, в) выпрямленное напряжение определяется не только углом управления α , но и дли-

тельностью протекания тока нагрузки λ , которая, в свою очередь, зависит от соотношения $\frac{X_d + X_a}{R_d}$ (рис. 2.2, д), где X_a – индуктивное сопротивление рассеяния обмоток силового трансформатора; X_d – индуктивное сопротивление сглаживающего реактора в цепи нагрузки:

$$E_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\lambda} \sqrt{2} E_2 \sin \theta d\theta = \frac{\sqrt{2} E_2}{2\pi} [\cos \alpha + \cos (\alpha + \lambda)]. \quad (2.2)$$

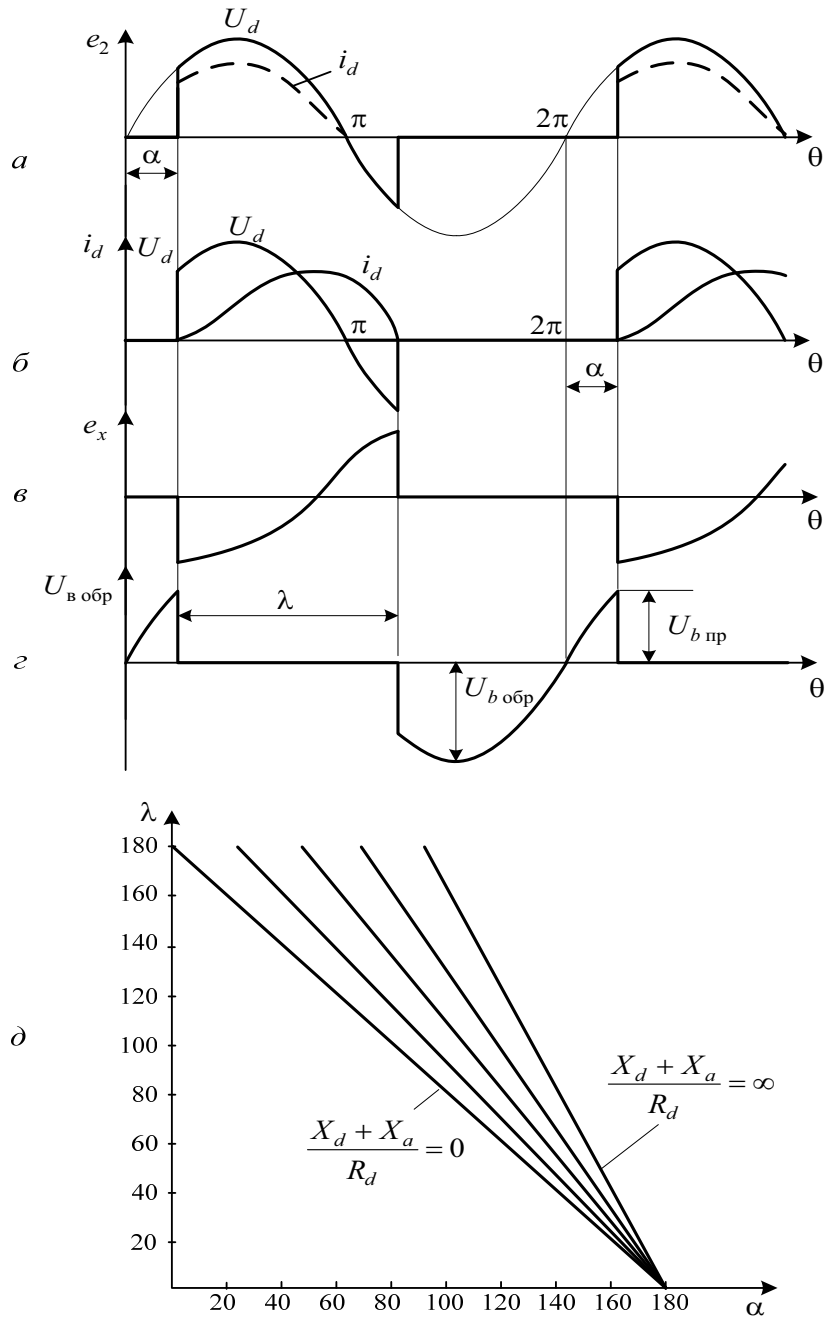


Рис. 2.2

В отличие от неуправляемых выпрямителей напряжение на X_d и обратное напряжение на вентиле имеют скачки в моменты отпирания и запираания вентиля (рис. 2.2, г), величина которых зависит от угла управления.

2.2.1. Двухполупериодный управляемый выпрямитель со средней точкой

Принципиальная схема выпрямителя изображена на рис. 2.3. Принцип действия его такой же, как и у неуправляемого выпрямителя, выполненного по такой же схеме. Введение угла управления обуславливает появления ряда особенностей.

Во-первых, в зависимости от соотношения $\frac{X_d}{R_d}$ в цепи нагрузки и угла управления α могут возникать следующие режимы работы выпрямителя:

1. Режим непрерывного тока (рис. 2.4, з), который возникает при условии $\alpha < \varphi$, где

$$\varphi = \arctg \frac{X_d}{R_d}.$$

2. Режим гранично-непрерывного тока (рис. 2.4, в), когда $\alpha = \varphi$.

3. Режим прерывистых токов (рис. 2.4, б), когда $\alpha > \varphi$.

Для режима непрерывного и гранично-непрерывного тока выпрямленное напряжение определяется из выражения

$$E_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}E_2 \sin\theta d\theta = \frac{2\sqrt{2}E_2 \cos \alpha}{\pi}. \quad (2.3)$$

Для режима прерывистых токов справедливо

$$E_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\lambda} \sqrt{2}E_2 \sin\theta d\theta = \frac{\sqrt{2}E_2}{2\pi} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \lambda)]. \quad (2.4)$$

Вследствие этого регулировочная характеристика управляемого выпрямителя $E_d = f(\alpha)$ существенно изменяется при изменении характера нагрузки. Вид регулировочных характеристик при различных значениях X_d представлен на рис. 2.5. Во-вторых, при изменении угла управления α изменяется длительность коммутационного интервала γ , т. к. запаздывание включения вентиля относительно точки естественной коммутации приводит к увеличению запирающей ЭДС, прикладываемой к выходящему из работы вентилю и, следовательно, к его более бы-

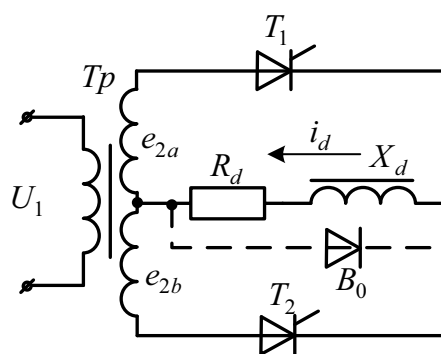


Рис. 2.3

струму запиранию (рис. 2.6). Угол γ_{01} на рис. 2.6 характеризует длительность угла коммутации при условии $I_{d1} = \text{const}$, $\alpha = 0$; $\gamma_{02} < \gamma_{01}$, соответствует $I_{d2} < I_{d1}$, при $\alpha = 0$ и т. д., т. е. чем меньше ток I_d , тем ниже идет зависимость $\gamma = f(\alpha)$.

В-третьих, внешняя характеристика управляемого выпрямителя, имея такой же падающий характер, как и у неуправляемого выпрямителя, из-за падения напряжения в коммутационном интервале ΔU_x , кроме того зависит от угла управления α .

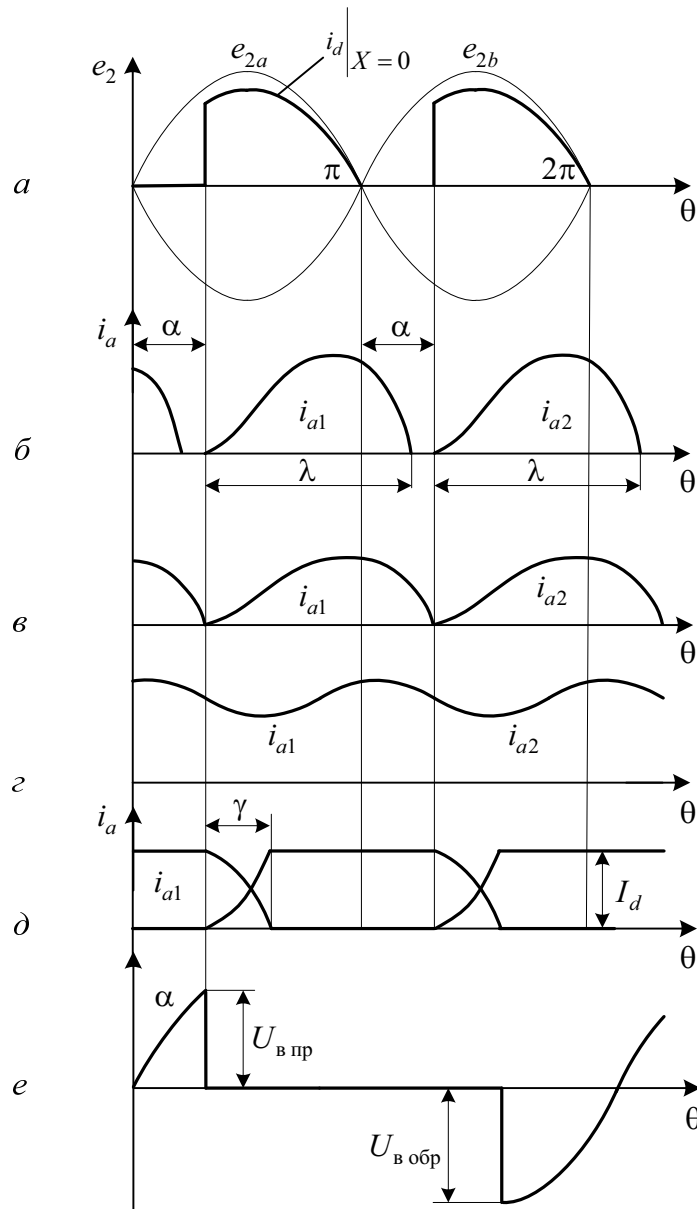


Рис. 2.4

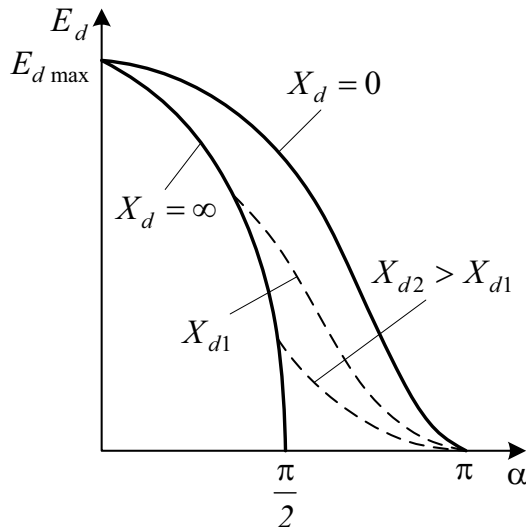


Рис. 2.5

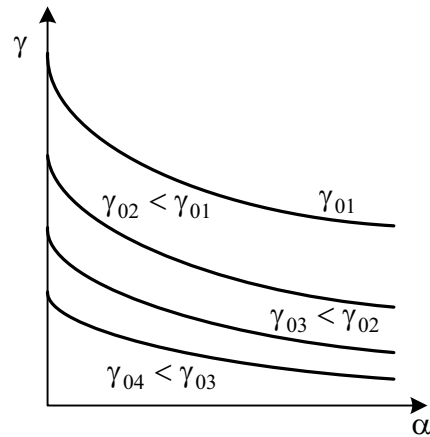


Рис. 2.6

Семейство внешних характеристик для различных значений угла α представлено на рис. 2.7.

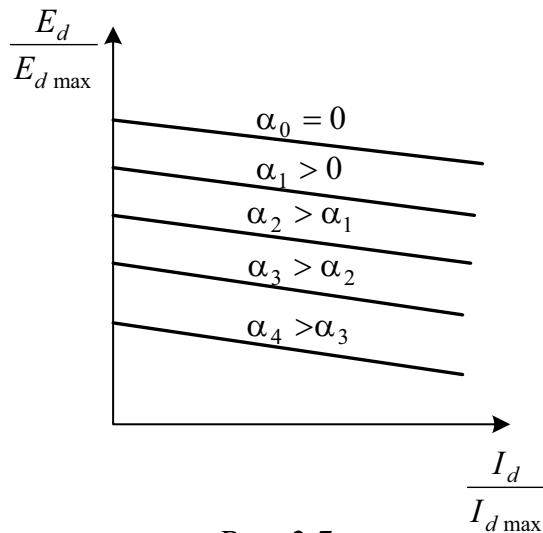


Рис. 2.7

В-четвёртых, скачки обратного напряжения на вентилях выпрямителя зависят не только от угла управления α , но и от угла коммутации γ (рис. 2.2, ε).

В-пятых, увеличение угла управления α приводит к ухудшению коэффициента мощности управляемого выпрямителя χ :

$$\chi = v \cos \varphi_1, \quad v = \frac{I_{1(1)}}{I_1}; \quad \cos \varphi_1 = \cos \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right), \quad (2.5)$$

где v – коэффициент искажения; $I_{1(1)}$ – действующее значение 1-й гармоники тока, потребляемого от питающей сети; I_1 – действующее значение

потребляемого из сети тока; φ_1 – угол сдвига первой гармоники потребляемого из сети тока по отношению к напряжению питающей сети.

Для улучшения коэффициента мощности управляемого выпрямителя вводится нулевой вентиль B_0 (рис. 2.3) (показан пунктиром), в результате чего достигается уменьшение угла φ_1 :

$$\varphi_1 = \frac{\alpha + \gamma}{2}. \quad (2.6)$$

2.2.2. Однофазный мостовой управляемый выпрямитель

Принципиальная схема его представлена на рис. 2.8, а. Принцип действия этого выпрямителя подобен принципу действия неуправляемого мостового однофазного выпрямителя. Особенности, связанные с введением угла управления α , характерные для управляемого выпрямителя со средней точкой, справедливы и для мостовой схемы. Кроме того, мостовой управляемый выпрямитель имеет и некоторые свои осо-

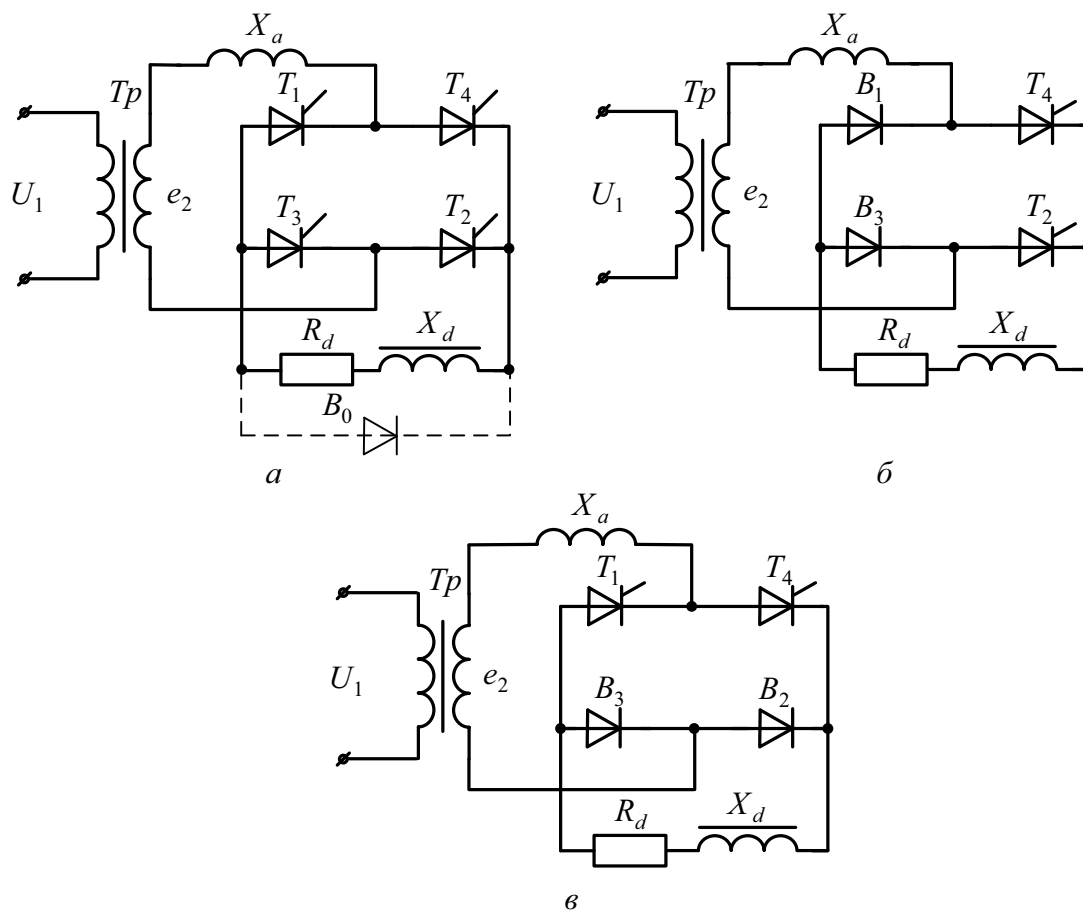


Рис. 2.8

бенности. В мостовой схеме можно не применять нулевой вентиль для улучшения коэффициента мощности. Эффект нулевого вентиля можно получить путём замены двух управляемых вентилях (либо в группе, либо в плече) на неуправляемые (рис. 2.8, б, в). При этом схема рис. 2.8, б имеет недостаток, заключающийся в том, что при большом значении X_d её невозможно выключить по цепи управления путём прекращения подачи управляющих сигналов на силовые вентили. Схема рис. 2.8, в, обеспечивая те же характеристики, свободна от этого недостатка. Схемы на рис. 2.8, б, в называют несимметричными или полууправляемыми.

2.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить схемы управления выпрямителей и особенности их работы. Перед началом работы установить следующие исходные положения ручек и переключателей:

- переключатели Π_1 и Π_2 установить в крайнее левое положение;
- движок реостата R_d установить в крайнее нижнее положение;
- тумблер «Сеть» – в положение «Выкл.»;
- тумблер «СУ» – в положение «Выкл.»;
- тумблер «ЗИ – УВ» – в положение «УВ»;
- ручку потенциометра « α – β » – в крайнее левое положение.

2. При помощи соединительных проводников собрать исследуемую схему (рис. 2.9–2.13).

3. После проверки схемы преподавателем включить питание стенда тумблером «Сеть».

Тумблером «СУ» подать питание на систему управления.

Исследуемым в работе схемам должны соответствовать следующие положения переключателя Π_1 :

- схеме рис. 2.9 – положение 0;
- схеме рис. 2.10 – положение 1;
- схемам рис. 2.11, 2.12, 2.13 – положение 2.

Для каждой исследуемой схемы заполнить табл. 2.1. Для этого, устанавливая ручкой « α – β » различные значения угла управления, начиная от $\alpha = 0$ до значения, соответствующего $E_d = 0$, снять показания приборов $V_2(E_d)$ и занести в табл. 2.1.

4. Снять значения $A2(I_a)$, $A1(I_1 \text{ и } I_{1(1)})$, регулируя величину тока нагрузки I_d реостатом R_d .

Значение индуктивности L_d необходимо изменять переключателем Π_2 . После окончания исследования каждой схемы обязательно выключить тумблеры «Сеть» и «СУ», а также вернуть все ручки в исходное положение!

По данным табл. 2.1 построить для каждой схемы семейства внешних характеристик $E_{d\alpha} = f(I_d)$ и семейства регулировочных характеристик $E_d = f(\alpha)$.

При исследовании схем рис. 2.9, 2.10, 2.11, 2.13 убедиться в возможности их включения по цепи управления при любых параметрах цепи нагрузки. Для этого прекратить подачу импульсов управления (выключить тумблер «СУ») и по приборам $V2$ и $I2$ убедиться в том, что выпрямитель выключился. Этот опыт провести для случая $L_d = 0$ и $L_d = \infty$.

При исследовании схемы рис. 2.12 убедиться в невозможности выключения выпрямителя по цепи управления при условии $L_d \gg 0$. Для этого, установив переключателем Π_2 наибольшее значение L_d , повторить опыт с выключением системы управления. По приборам $V2$ и $I2$ и по осциллографу убедиться в том, что выпрямитель продолжает работать.

5. Повторить снятие указанных характеристик для схем рис. 2.9, 2.10, 2.11 при подключенном нулевом вентиле B_0 .

6. Для каждой исследуемой схемы повторить снятие тех же характеристик для тех же углов управления α и тех же значениях индуктивности L_d при работе выпрямителя на противоЭДС. Для этого в цепь нагрузки подключить источник E_0 (пунктирные линии на рис. 2.9–2.13), а затем, изменяя величину противоЭДС потенциометром R_d , заполнить табл. 2.1 для каждой исследуемой схемы и построить графические зависимости.

7. Для всех исследуемых режимов снять осциллограммы токов и напряжений вентиля выпрямителя R_d , L_d , обмоток трансформатора.

По окончании работы выключить питание стенда, питание системы управления, разобрать схему, все ручки вернуть в исходное положение.

Таблица 2.1

L_d	α	E_d					I_d					$I_{1(0)}$					I_1					$v = \frac{I_{1(0)}}{I_1}$					$\cos \varphi_1$					X														
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5										
$L_d = 0$	α_1																																													
	α_2																																													
	α_3																																													
	α_4																																													
	α_5																																													
$L_d = \infty$	α_1																																													
	α_2																																													
	α_3																																													
	α_4																																													
	α_5																																													
$0 < L_d < \infty$	α_1																																													
	α_2																																													
	α_3																																													
	α_4																																													
	α_5																																													

2.4. Схемы исследуемых управляемых выпрямителей

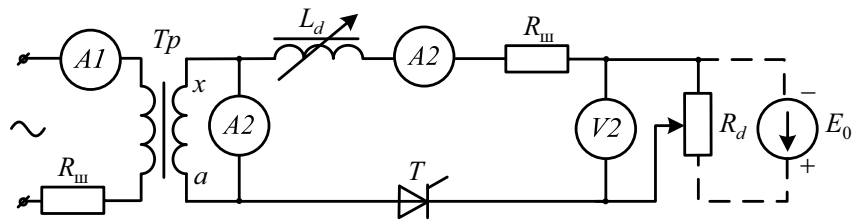


Рис. 2.9

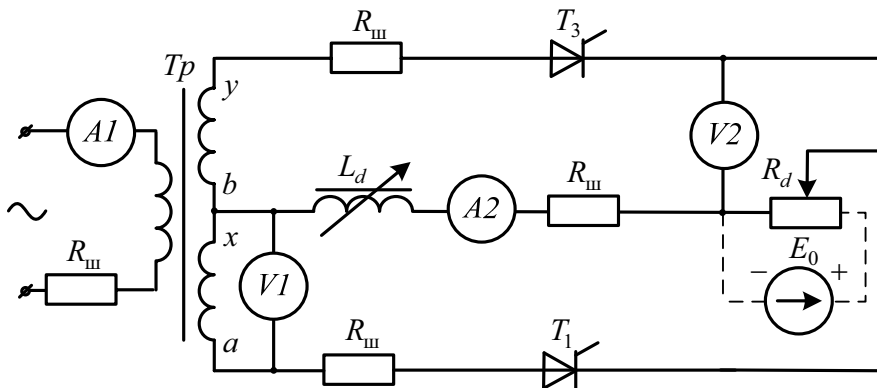


Рис. 2.10

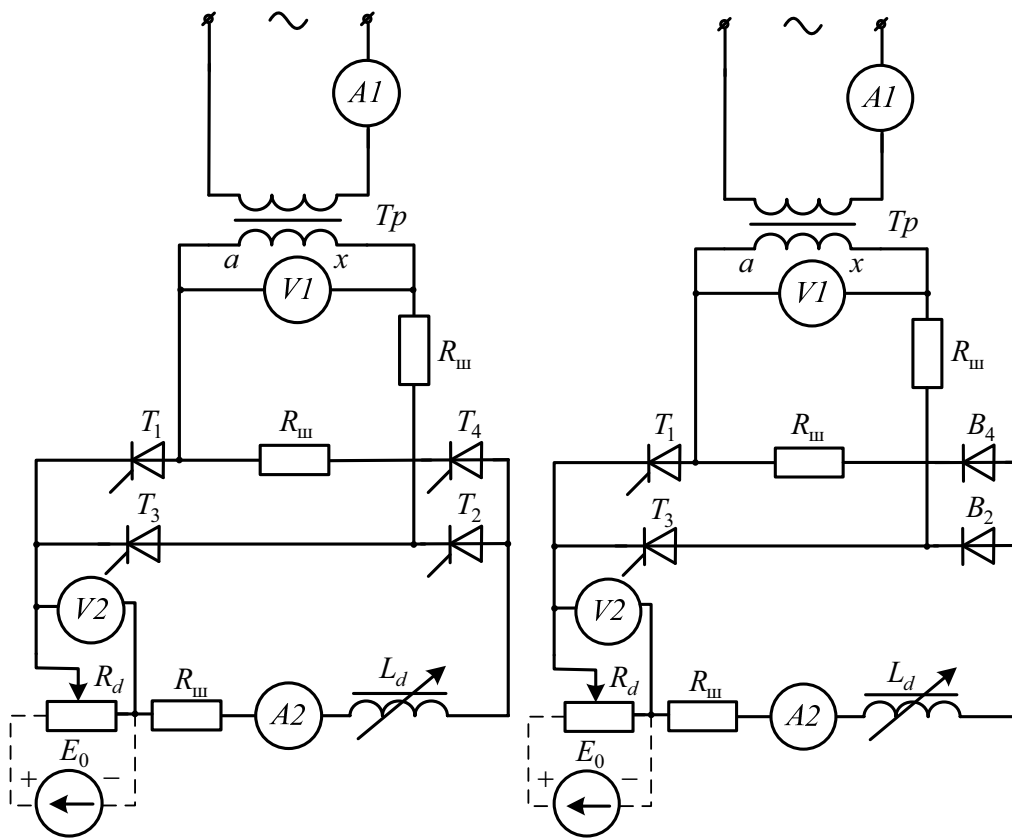


Рис. 2.11

Рис. 2.12

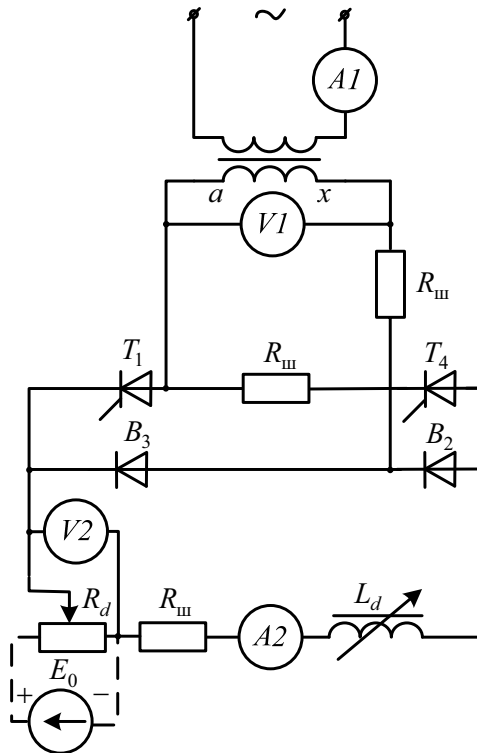


Рис. 2.13

2.5. Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Схемы исследуемых управляемых выпрямителей.
3. Результаты экспериментов (табл. 2.1) для каждой схемы; построенные семейства характеристик $E_{d\alpha} = f(I_d)$, $E_d = f(\alpha)$ для различных режимов работы.
4. Осциллограммы токов и напряжений на всех элементах схемы для всех исследуемых режимов.
5. Выводы по проделанной работе.

2.6. Контрольные вопросы

1. Почему в управляемых выпрямителях длительность коммутационного интервала γ зависит от угла управления α ?
2. Объяснить ухудшение коэффициента мощности управляемого выпрямителя с увеличением угла управления α ?
3. Объяснить отличие внешних характеристик управляемого выпрямителя при $\alpha > 0$ в режиме $L_d = 0$ и $L_d = \infty$.
4. Какие способы улучшения коэффициента мощности управляемых выпрямителей?

5. Почему несимметричный выпрямитель по схеме рис. 2.12 невозможно выключить по цепи управления при $L_d = \infty$?
6. Объяснить физический смысл коэффициента мощности χ управляемого выпрямителя?
7. По осциллограммам токов и напряжений определить: угол управления α ; длительность проводящего состояния вентиля λ ; угол коммутации γ .

2.7. Список литературы

1. Петрович В.П., Воронина Н.А. Силовые преобразователи электрической энергии. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 255 с.
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
3. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК. – СПб.: Учитель и ученик: Корона принт, 2002. – 304 с.
4. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1980. – 423 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

РЕГУЛЯТОР ТЕМПЕРАТУРЫ

С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

3.1. Цель работы

Ознакомиться с принципом построения многоуровневой автоматизированной системы управления, изучить особенности теплоинерционного объекта управления как потребителя электроэнергии, возможные способы регулирования его температуры, методы структурно-параметрического синтеза технологического регулятора температуры, ознакомиться с примером практической реализации системы автоматического регулирования температуры с микропроцессорным управлением.

3.2. Теоретические сведения

Системы автоматического регулирования температуры находят применение в самых разных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Это могут быть инкубаторы на птицефермах, системы точного поддержания температуры и создания необходимого микроклимата на объектах электронной и аэрокосмической промышленности, в любых цехах и помещениях, где работают люди. В качестве объекта управления могут выступать одно или несколько помещений любых размеров, различные камеры, поверхности тел и т.п. Один из наиболее эффективных способов поддержания заданной температуры, широко используемый в настоящее время, это регулирование оттока (или притока) воздуха, а вместе с ним избыточного тепла, т.е. создание системы вентиляции.

В настоящее время развитие таких систем идет по пути создания высокоэффективных промышленных установок на базе регулируемых электроприводов (РЭП), потребителей электроэнергии и программируемых промышленных контроллеров с широкими интерфейсными возможностями. Это позволяет одновременно с экономией электроэнергии решать задачи автоматизации производства с помощью автоматизированной системы управления (АСУ) и обеспечивать оптимизацию параметров технологических процессов.

Наиболее экономичным способом регулирования производительности вентиляторов является применение регулируемого электропривода. Для мощных установок можно рекомендовать несколько менее экономичный, но более простой способ регулирования производительности – изменением угла поворота лопаток осевого вентилятора при постоянной скорости приводного двигателя. Важным элементом интенсификации производства и повышения его производительности является автоматизация. Автоматизация позволяет связать в единую сеть большое количество технологических установок, механизмов, потребителей электроэнергии и других объектов производства. Управление всеми объектами может осуществляться от общей ЭВМ верхнего уровня. Это позволяет оптимизировать связи между объектами, уменьшить численность персонала.

3.2.1. Схема организации АСУ технологического процесса

Одной из особенностей развития современных технологий является повышение технологических требований к динамическим и точностным показателям электропривода, расширение и усложнение его функций, связанных с технологическим процессом, и соответствующее возрастание сложности систем управления (СУ) электроприводами. Их развитие идет по пути создания систем числового программного управления и расширения использования современной вычислительной техники, создаваемой непосредственно для целей управления на базе микропроцессоров.

Цифровые методы обработки информации существенно повышают уровень и степень автоматизации производства. Решение комплексных задач, связанных со сбором и обработкой информации, становится во много раз эффективнее, чем при использовании традиционных средств.

При комплексной автоматизации сложного технологического процесса создается многоуровневая распределенная автоматизированная система управления (АСУ). В качестве АСУ среднего уровня в настоящее время используют преимущественно микропроцессорные СУ, как правило, конструктивно законченные устройства, получившие название промышленных рабочих станций, промышленных компьютеров, промышленных программируемых контроллеров.

Преимущества цифровых методов обработки информации и развитие микропроцессорной техники способствуют расширению применения микропроцессорных СУ и на нижнем уровне управления двигателями, статическими преобразователями и т.п. Наиболее перспективное направление – создание встроенных в оборудование СУ на базе специализированных контроллеров. При этом контроллеры нижнего уровня управления могут подключаться к системе среднего уровня либо через стандартные последовательные и параллельные интерфейсы, либо пу-

тем установки на системную шину в качестве специализированных устройств сопряжения с объектом.

Одна из возможных схем организации многоуровневой АСУ технологического процесса показана на рис. 3.1.

Система имеет три уровня иерархии. На верхнем уровне находится ЭВМ, на среднем – контроллеры 1, 2, 3 и на нижнем – электроприводы, которые воздействуют на объект автоматизации непосредственно. Обратная связь по температуре принципиально может быть подана на вход любого из этих элементов: ЭВМ; контроллера (режим А на рис. 3.1); преобразователя частоты (режим Б на рис. 3.2), т.к. микропроцессорная система преобразователя EI-9001 имеет встроенный алгоритм технологического регулятора. Тогда этот элемент будет выполнять функцию управления контуром технологического параметра – в нашем случае – температурой нагрева. В его задачу входит определение ошибки и формирование задания в соответствии с заложенным алгоритмом управления на соответствующую координату – скорость электродвигателя.

Если обратная связь реализована через ЭВМ, то по принципу организации такая система управления конкретной координатой будет называться **неавтономной**. Если же обратная связь будет реализована через контроллер или микропроцессорную систему преобразователя, то по принципу организации управления такая система будет являться **автономной** относительно, соответственно, ЭВМ или контроллера как устройства верхнего уровня.

В соответствии с функциональной схемой рис. 3.1 ЭВМ верхнего уровня имеет следующие функции:

- программирование микропроцессорных систем среднего уровня;
- формирование заданий системам нижних уровней;
- контроль за выполнением заданий.

Автономная система управления технологическим процессом отдельного производственного объекта реализована на базе контроллера, в функции которого входит:

- распределение заданий на электроприводы;
- решение задачи интерполяции задания во времени;
- управления контуром технологического параметра;
- передачи информации о результатах выполнения на ЭВМ.

Нижней уровень иерархии АСУ представлен исполнительным электроприводом, который непосредственно воздействует на объект автоматизации.

Если обратные связи по температуре будут заведены непосредственно на входы преобразователей частоты (на рис. 3.2 показаны пунктирными линиями – режим Б), то задача управления отдельным конту-

ром технологического параметра переходит от контроллера к технологическому регулятору преобразователя.

Функции СУ нижнего уровня также зависят от выбранного принципа взаимодействия её с системой более высокого уровня.

И автономный, и неавтономный принципы построения системы имеют свои преимущества и недостатки. Выбор того или другого принципа на этапе проектирования системы основывается на технико-экономическом анализе.

3.2.2. Объект управления

Объект управления в рассматриваемой системе обладает теплоинерционными свойствами. Если тепловые процессы в нагревательном шкафу рассматривать как однородное тело, обладающее бесконечно большой теплопроводностью и имеющее одинаковую температуру во всех точках объёма, и при этом принять следующие допущения:

- скорость вращения вентилятора $\omega_B = 0$;
- теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна первой степени разности температур шкафа и окружающей среды;
- температура окружающей среды постоянна;
- теплоёмкость шкафа, мощность нагревательных элементов и теплоотдача не зависят от температуры шкафа, тогда уравнение теплового баланса можно записать в следующем виде:

$$P \cdot dt = A \cdot \tau \cdot dt + C \cdot d\tau. \quad (3.1)$$

Уравнение (3.1) имеет постоянные коэффициенты P , A и C , где P – количество теплоты (мощность), выделяемая нагревательными элементами в единицу времени, Дж/с;

A – теплоотдача шкафа в окружающую среду в единицу времени при разности температур в 1°C , Дж/(с \cdot °C);

C – теплоёмкость шкафа – количество теплоты, необходимое для повышения температуры шкафа на 1°C , Дж/°C.

Уравнение (3.1) записано относительно превышения температуры шкафа над температурой окружающей среды

$$\tau = T - T_{\text{ОКР}},$$

где T , $T_{\text{ОКР}}$ – температура шкафа и окружающего воздуха, соответственно, °C.

Уравнение (3.1) можно привести к виду

$$P - A \cdot \tau = C \cdot \frac{d\tau}{dt} \quad (3.2)$$

или

$$\frac{P}{A} = \tau + \frac{C}{A} \cdot \frac{d\tau}{dt}. \quad (3.3)$$

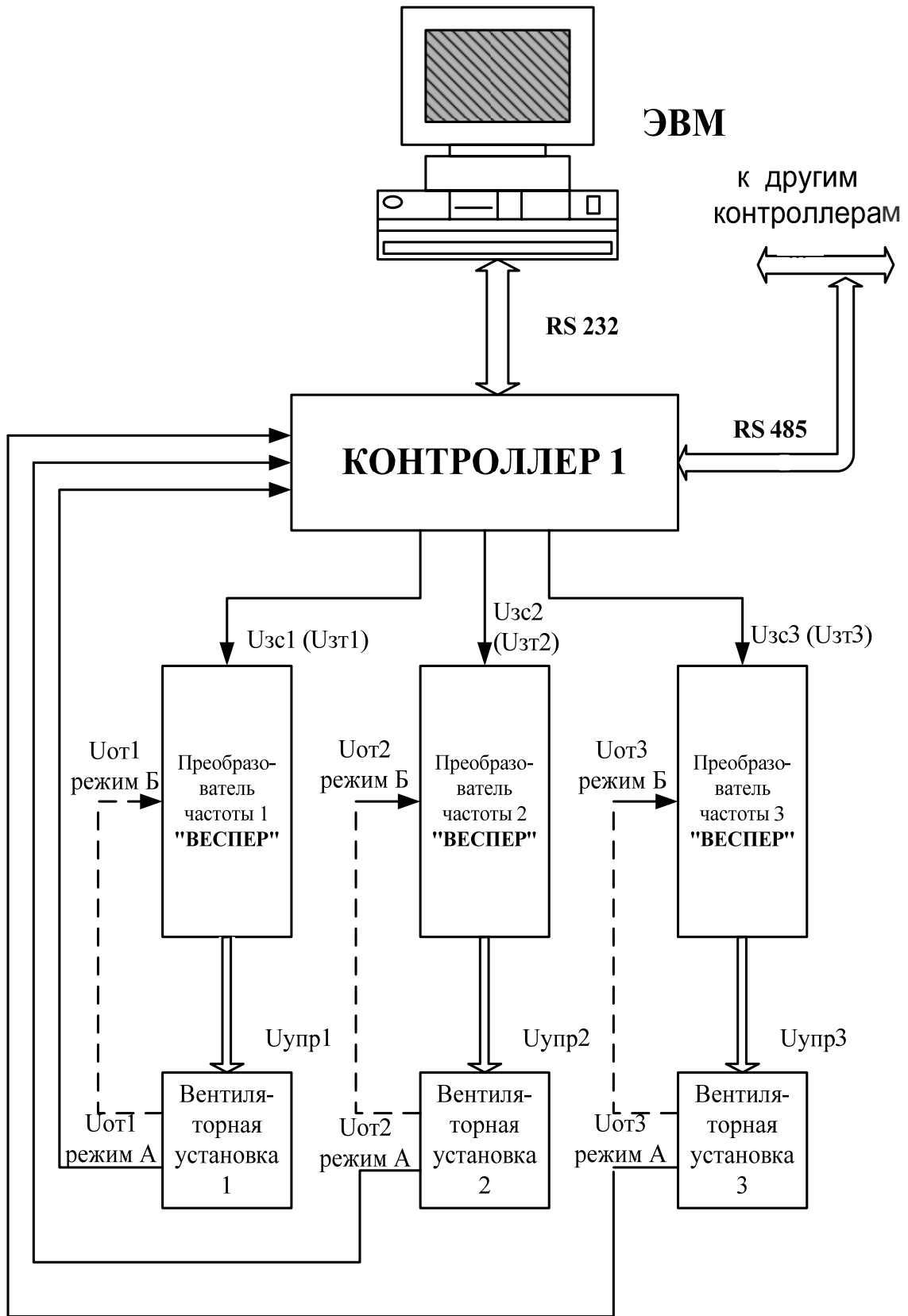


Рис. 3.1. Схема организации многоуровневой системы автоматизации

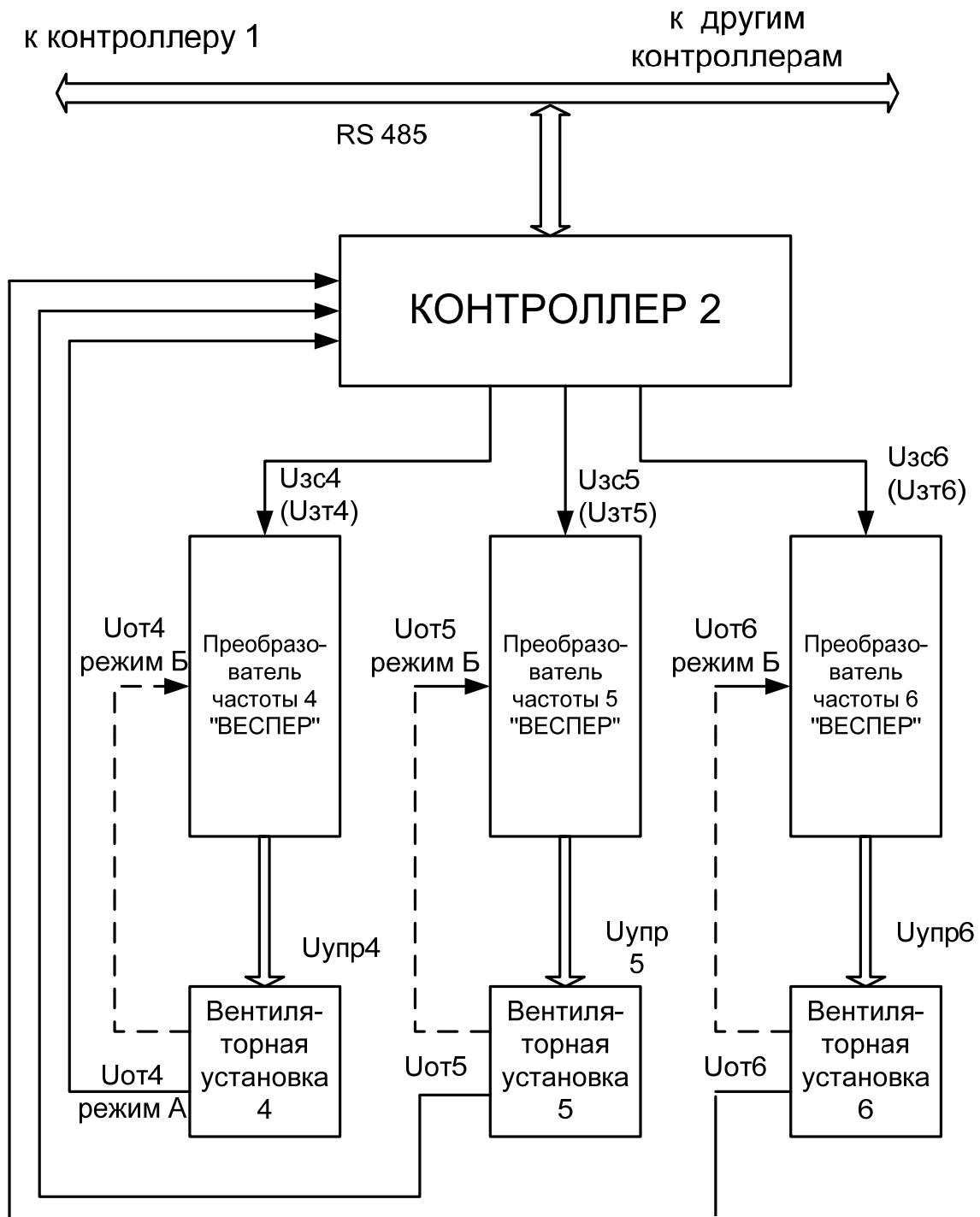


Рис. 3.2. Схема организации многоуровневой системы автоматизации

В свою очередь, уравнение (3.3) можно представить в виде

$$\tau + T_H \cdot \frac{d\tau}{dt} = \tau_y, \quad (3.4)$$

где $T_H = C/A$ – постоянная времени нагрева шкафа – время, в течение которого превышение температуры от $\tau = 0$ достигло бы установившегося значения $\tau = P/A$ при $P = \text{const}$ и отсутствии теплоотдачи в окружающую среду $A = 0$.

Решение уравнения (3.4) имеет вид

$$\tau = \tau_y \cdot (1 - e^{-t/T_H}) + \tau_0 \cdot e^{-t/T_H}, \quad (3.5)$$

где τ_0 – начальное значение превышения температуры шкафа над температурой окружающей среды.

Если $\tau_0 = 0$, то (3.5) принимает вид

$$\tau = \tau_y \cdot (1 - e^{-t/T_H}). \quad (3.6)$$

В соответствии с выражением (3.2) структурная схема нагревательного шкафа как объекта имеет вид, представленный на рис. 3.3, а.

При сделанных допущениях нагревательный шкаф можно рассматривать как линейное инерционное (апериодическое) звено первого порядка (см. рис. 3.3, б) с передаточной функцией:

$$W_{\text{об}}(p) = \frac{\tau(p)}{P(p)} = \frac{K_{\text{об}}}{T_{\text{об}} \cdot p + 1},$$

где $K_{\text{об}} = \frac{1}{A}$ – коэффициент передачи объекта, $\frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{с}}{\text{Дж}}$;

$T_{\text{об}} = T_H = \frac{C}{A}$ – постоянная времени объекта, с.

При вращении вентилятора ($\omega_B \neq 0$) возрастает значение теплоёмкости объекта C , т.к. увеличивается общее количество нагреваемого воздуха и теплопередача объекта A . Структурная схема нагревательного шкафа в этом случае оказывается существенно нелинейной и может быть представлена в виде, приведённом на рис. 3.3, в, где функции F_1 и F_2 определяют зависимость параметров объекта C и A от объёма воздуха, подаваемого вентилятором.

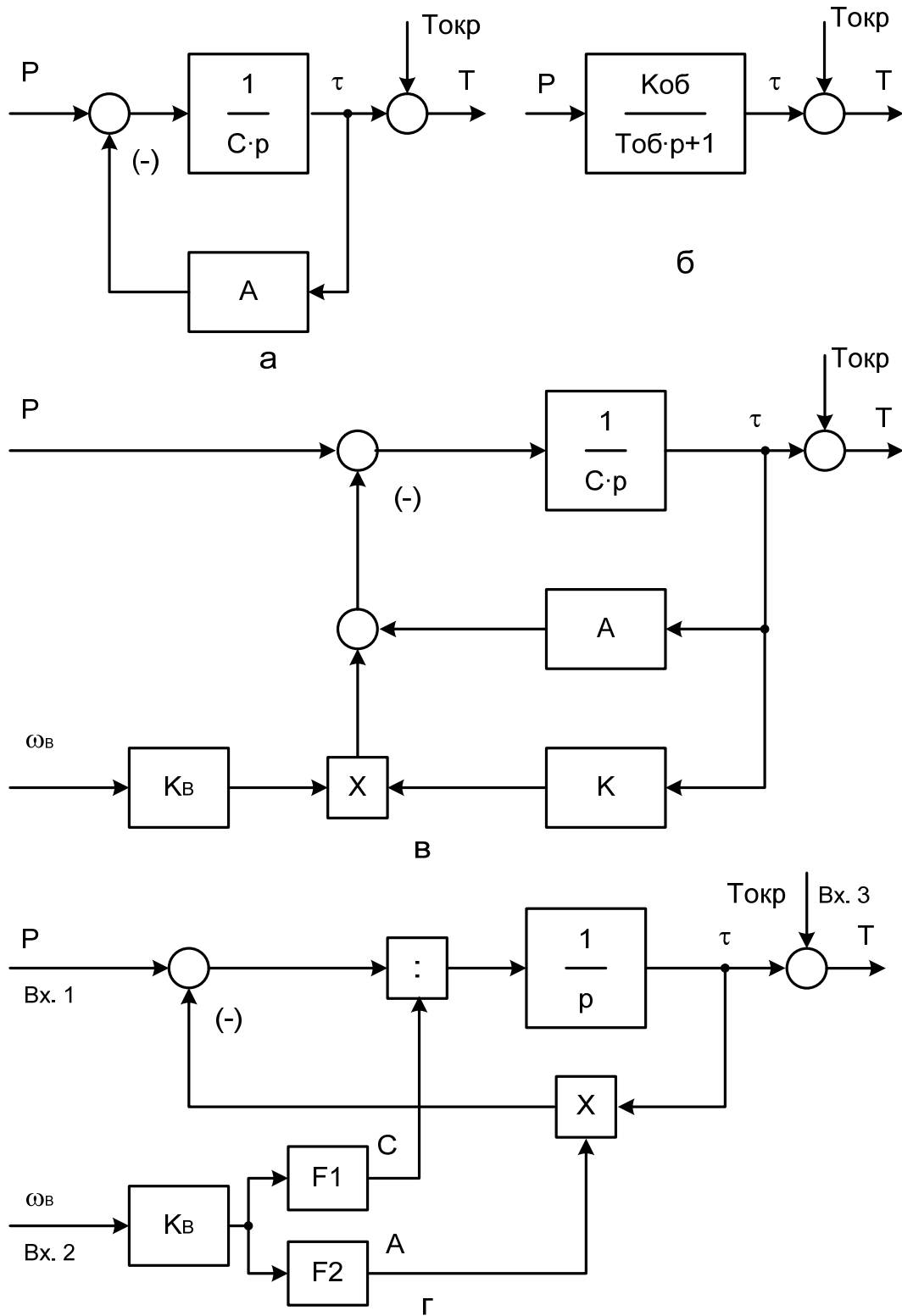


Рис. 3.3. Структурная схема нагревательного шкафа как объекта управления: а, б – линеаризованная; в, г – нелинейная

На рис. 3.4 *а, б и в* приведены кривые нагрева шкафа при изменении одного из параметров P , A и C . Здесь же приведены выражения для определения значения изменённого параметра по результатам опыта. Как указано выше, при изменении скорости вращения вентилятора следует ожидать одновременного изменения теплоёмкости и теплоотдачи объекта. Характер переходного процесса нагрева шкафа при $P = \text{const}$ и при увеличении скорости вентилятора будет иметь вид, представленный на рис. 3.4, *б* пунктирной линией.

Изменения параметров объекта для этого случая могут быть найдены по выражениям:

$$A_2 = A_1 \cdot \frac{\tau_{уст1}}{\tau_{уст2}}; \quad C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{\tau_{уст1}}{\tau_{уст2}} \cdot \frac{T_{H1}}{T_{H2}} \right).$$

3.2.3. Линеаризованная САР температуры

Первоначально синтез корректирующих устройств системы производят для линеаризованной системы с помощью соответствующих разработанных методик.

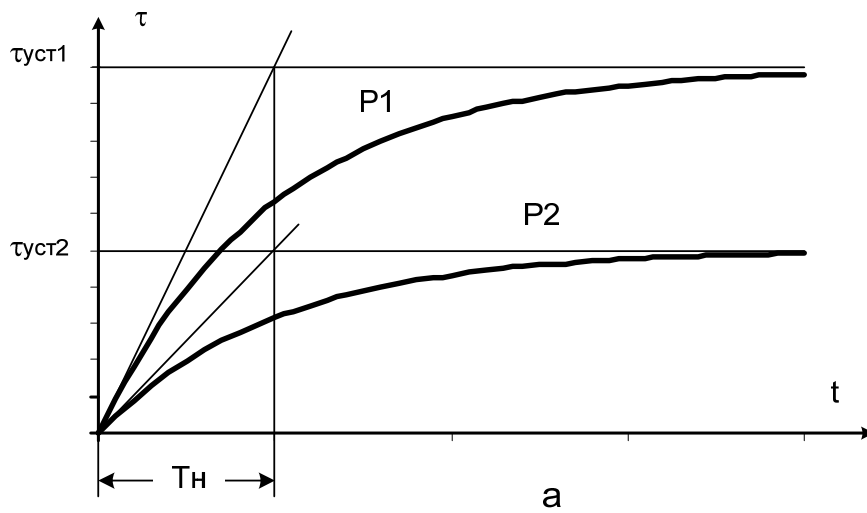
1. Линеаризованная схема САР температуры нагревательного шкафа показана на рис. 3.5. Структурная схема системы составлена в приращениях. Все параметры схемы определены в окрестности точки работы с заданной температурой $T = T_{\text{Зад}}$ при $T_{\text{ОКР}} = \text{const}$ и $P_{\text{НАГР}} = \text{const}$ ($\Delta P_{\text{НАГР}} = 0$). Мощность P измеряется в ваттах ($1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$).

Регулятор температуры с передаточной функцией $W_{\text{РТ}}(p)$ на основе сигнала задания и сигнала обратной связи вырабатывает задание на скорость РЭП, который представлен пропорциональным звеном $K_{\text{РЭП}}$, т.к. постоянная времени объекта управления намного больше постоянных времени РЭП.

Объект управления представлен в соответствии со структурной схемой рис. 3.3, *в* и имеет постоянные параметры при $T = T_{\text{Зад}}$: $K_4 = 1/C$; $K_3 = A$.

Примем, что мощность охлаждения по каналу управления системы пропорциональна скорости вращения вентилятора, тогда коэффициент пропорциональности $K_1 = \text{const}$ при работе в окрестностях точки $T = T_{\text{Зад}}$.

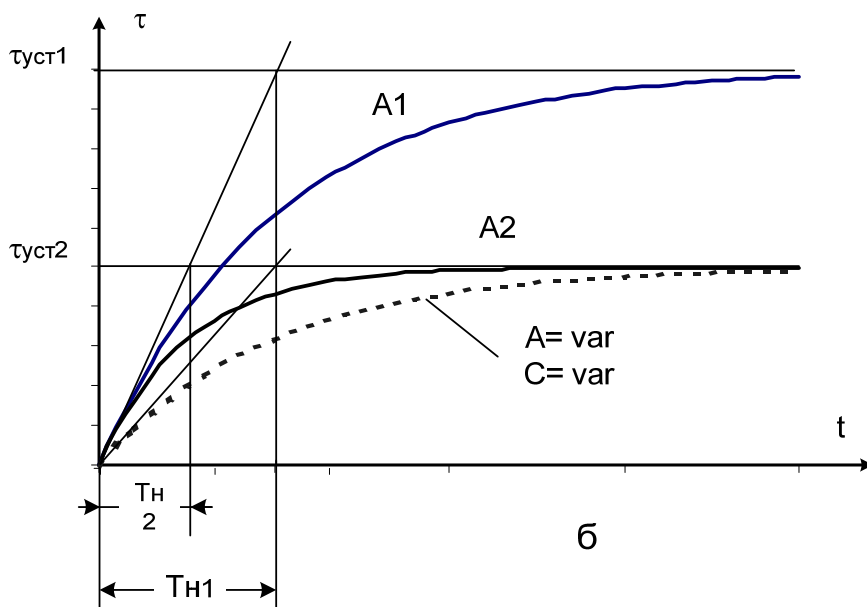
Датчик температуры представлен аperiodическим звеном с параметрами $K_{\text{ДТ}}$ – коэффициент преобразования температуры в напряжение обратной связи; $T_{\text{ДТ}}$ – постоянная времени преобразования.



$P = \text{var}$

$P_2 < P_1$

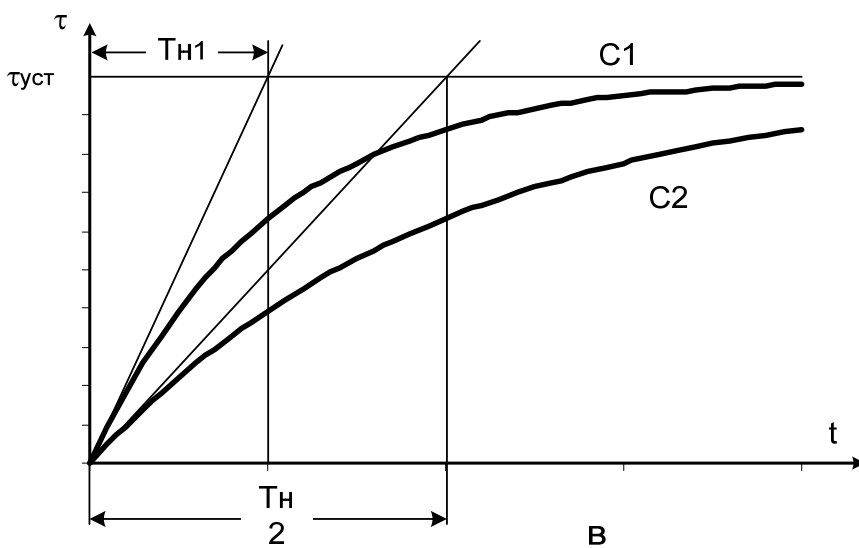
$$P_2 = P_1 \frac{\tau_{уст2}}{\tau_{уст1}}$$



$A = \text{var}$

$A_2 > A_1$

$$A_2 = A_1 \cdot \frac{\tau_{уст1}}{\tau_{уст2}} = A_1 \cdot \frac{T_{H1}}{T_{H2}}$$



$C = \text{var}$

$C_2 > C_1$

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{T_{H2}}{T_{H1}}$$

Рис. 3.4. Кривые нагрева объекта при изменении параметров

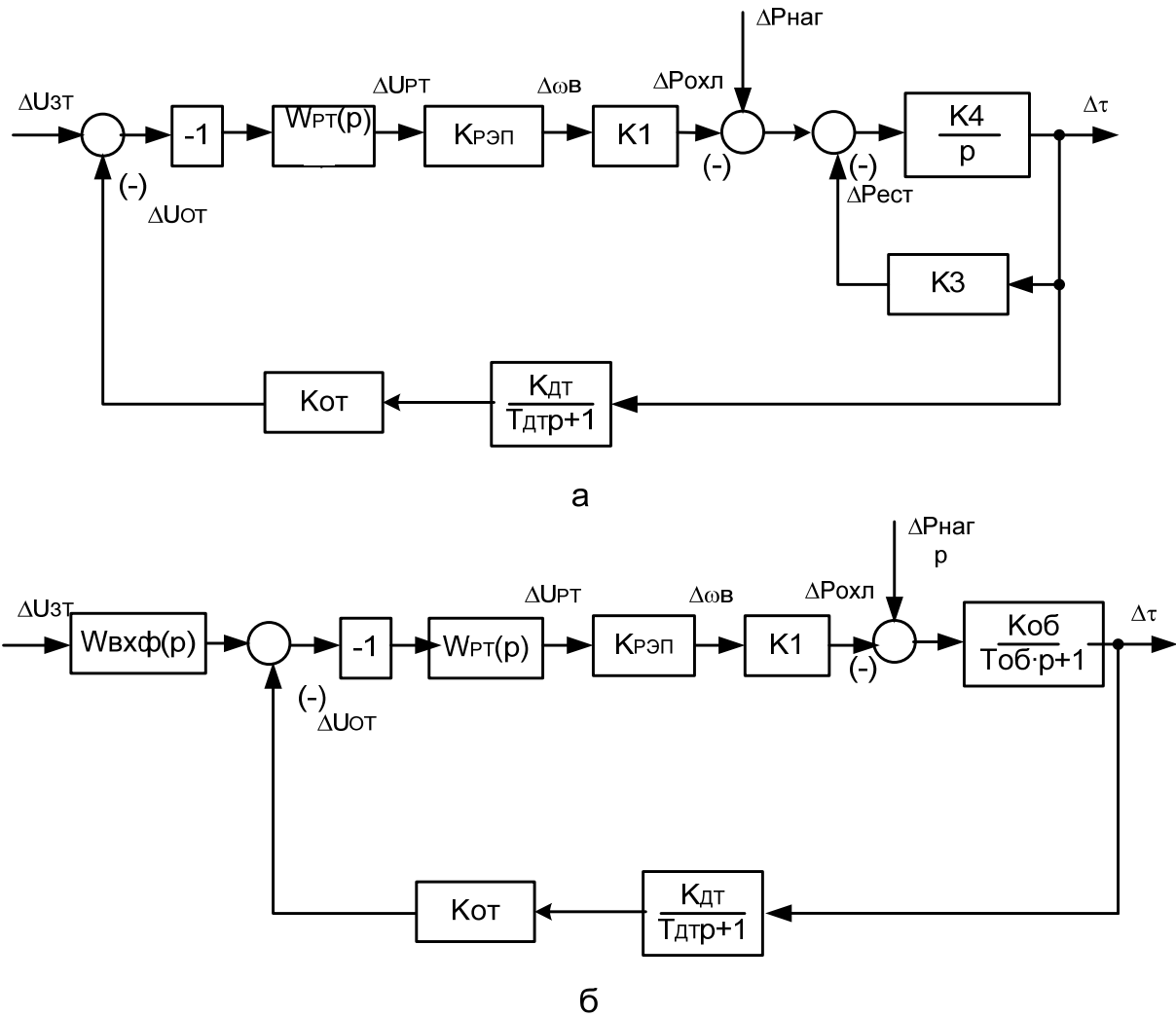


Рис. 3.5. Линеаризованная структурная схема САУ

2. Объект управления можно привести к аperiodическому звену, пользуясь известными правилами преобразования структурных схем. Интегрирующее звено $W(p) = \frac{K4}{p}$, охваченное безынерционной отрицательной обратной связью с коэффициентом $K3$ приводится к аperiodическому звену с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{Kоб}{Тоб \cdot p + 1},$$

где $Kоб = 1/K3$ – коэффициент передачи объекта, °C/Вт;

$Тоб = 1/K3 \cdot K4$ – постоянная времени объекта, с.

Тогда линеаризованная структурная схема примет вид, показанный на рис. 3.5, б.

3. Элементы схемы имеют следующие параметры, найденные в окрестностях точки $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$K_{\text{рэл}} = 30 \frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}};$$

$$K_1 = 0,1 \frac{\text{Вт} \cdot \text{рад}}{\text{с} \cdot \text{ }^\circ\text{C}};$$

$$K_3 = 5 \frac{\text{Вт}}{\text{ }^\circ\text{C}};$$

$$K_4 = 0,41 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} / \text{Вт} \cdot \text{с};$$

$$K_{\text{дт}} = 0,1 \frac{\text{В}}{\text{ }^\circ\text{C}};$$

$$T_{\text{дт}} = 25 \text{ с};$$

$$K_{\text{об}} = 1/K_3 = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт};$$

$$T_{\text{об}} = 1/K_3 \cdot K_4 = 488 \text{ с}.$$

4. Оптимизация контура регулирования заключается в выборе типа регулятора и параметров его настройки, которые позволили бы получить желаемое качество переходных процессов по управлению и по возмущению, а также получить желаемый астатизм системы.

Оптимизация контура рис. 3.5 по управлению (входной сигнал $\Delta U_{\text{зт}}$) по техническому (модульному) оптимуму (МО) сводится к следующему [1]:

- поскольку $T_{\text{об}} \gg T_{\text{дт}}$, то $T_{\text{дт}}$ принимаем за малую постоянную времени, а большую $T_{\text{об}}$ компенсируем;
- выбираем пропорционально-интегральный регулятор температуры (ПИ-РТ) с передаточной функцией

$$W_{\text{РТ}} = K_{\text{РТ}} \cdot \frac{T_{\text{РТ}} \cdot p + 1}{T_{\text{РТ}} \cdot p};$$

- определяем параметры регулятора

$$T_{\text{РТ}} = T_{\text{об}} = 488 \text{ с};$$

$$K_{\text{РТ}} = \frac{T_{\text{об}}}{2 \cdot T_{\text{дт}} \cdot K_{\text{дт}} \cdot K_{\text{от}} \cdot K_{\text{рэл}} \cdot K_1 \cdot K_{\text{об}}} = \frac{488}{2 \cdot 25 \cdot 0,1 \cdot 30 \cdot 0,1 \cdot 0,2} = 162,67,$$

где $K_{\text{от}} \cdot K_{\text{дт}} = \frac{U_{\text{зтмакс}}}{\Delta \tau_{\text{макс}}} = \frac{10}{100} = 0,1 \text{ В}/\text{ }^\circ\text{C};$

- на входе контура устанавливаем входной фильтр, оптимизирующий переходный процесс по управлению, с передаточной функцией

$$W_{\text{вхф}} = \frac{1}{T_{\text{вхф}} \cdot p + 1},$$

где $T_{\text{вхф}} = T_{\text{дт}} = 25 \text{ с}.$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования температуры по управлению с фильтром на входе имеет вид

$$W_{3.у}(p) = \frac{1 / (K_{от} \cdot K_{дт})}{2 \cdot T_{дт}^2 \cdot p^2 + T_{дт} \cdot p + 1}.$$

Переходные процессы в контуре при отработке ступенчатого входного воздействия имеют колебательный характер с одним перерегулированием $\sigma=4,3\%$, временем переходного процесса (окончательного вхождения в зону 5%) $t_{пу} = 4,1 \cdot T_{дт} = 102,5$ с, и равной нулю статической ошибкой по управлению.

Передаточная функция по возмущению (возмущающее воздействие $\Delta R_{нагр}$) оптимизированного таким образом контура регулирования температуры имеет вид

$$W_{3.в}(p) = \frac{K_o \cdot [2 \cdot T_{дт} \cdot p \cdot (T_{дт} \cdot p + 1)]}{(T_o \cdot p + 1)(2 \cdot T_{дт}^2 \cdot p^2 + T_{дт} \cdot p + 1)}.$$

Для контура характерно отсутствие установившейся ошибки регулирования при отработке скачка возмущающего воздействия.

Поскольку оптимизация контура регулирования может быть проведена при постоянных значениях параметров его звеньев, то возникает практически важный вопрос: при каких значениях переменных параметров объекта управления следует выбирать постоянные настройки регулятора, чтобы во всём диапазоне изменения параметров контур регулирования обеспечивал бы требуемые показатели качества работы. Если регулятор с постоянными параметрами не обеспечивает качества работы при возможных изменениях параметров объекта, то необходимо выбрать **адаптивный регулятор**.

3.2.4. Нелинейная САР температуры

Структурная схема САР температуры с учетом основных нелинейностей, разработанная на основе рис. 3.3, 2, представлена на рис. 3.6.

Поясним назначение звеньев приведённой структурной схемы, их связь с элементами физической установки.

1. Входной фильтр или задатчик интенсивности.
2. Звено, приводящее в соответствие описание математической модели, и свойства физического объекта.
3. Звено с ограничениями, которое, во-первых, позволяет регулятору работать только в положительной области своей характеристики. Это связано с однополярностью характеристики управления, т.к. система управления может обеспечить охлаждение объекта при его нагреве

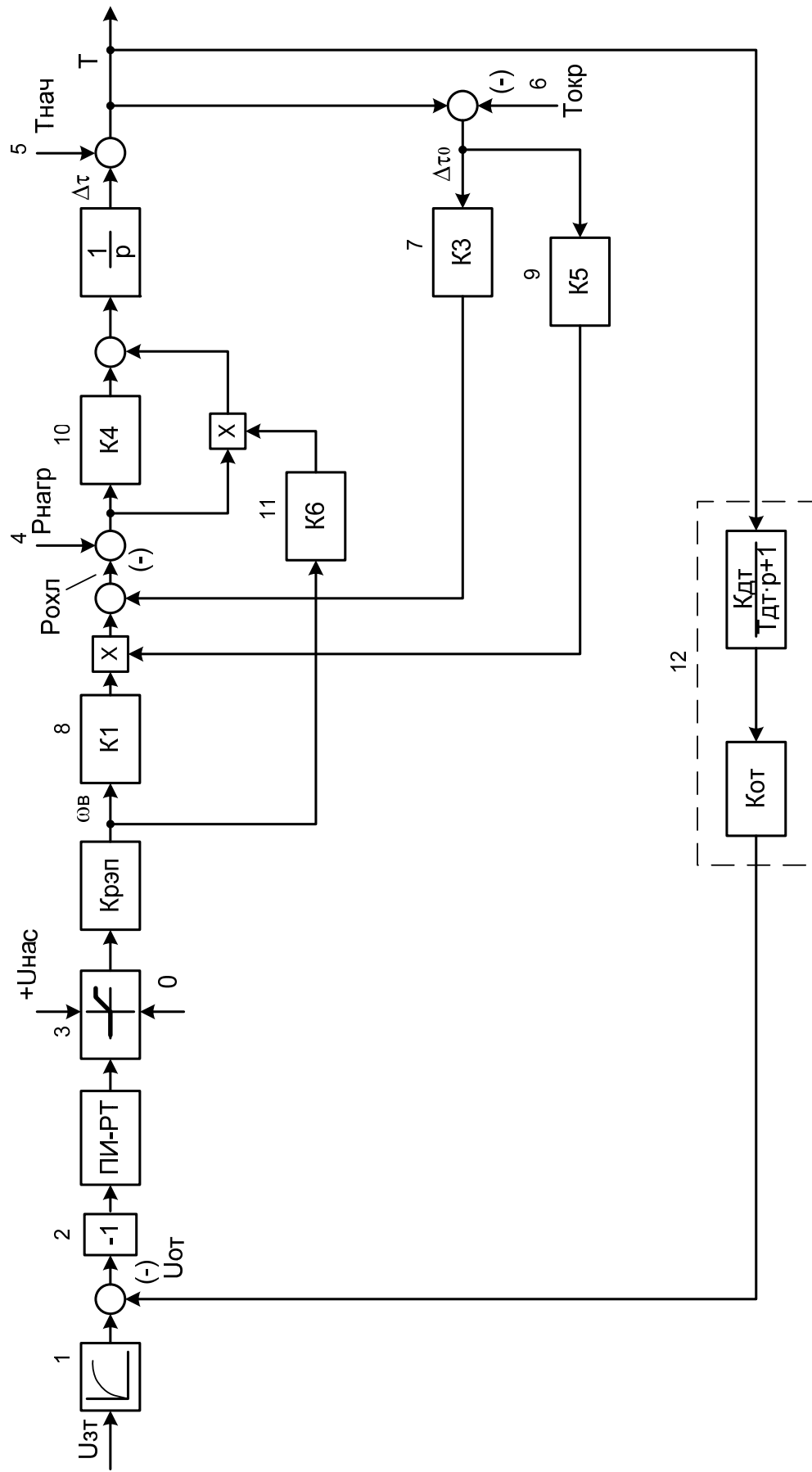


Рис. 3.6. Нелинейная структурная схема САР температуры

сверх заданной температуры, но не может нагреть его в обратном случае. Во-вторых, насыщение выходной координаты звена учитывает максимально возможную скорость вентилятора $\omega_B = 300 \text{ с}^{-1}$, развиваемую электродвигателем при управлении от частотного преобразователя методом U/f в нереверсивном режиме.

4. Вход задания мощности нагревательных элементов $R_{\text{нагр}}$.
5. Вход задания начальной температуры объекта управления $T_{\text{нач}}$. Этим учитывается, что начальная температура объекта в различных опытах может быть разной.
6. Вход задания температуры окружающей среды $T_{\text{окр}}$, которая в общем случае предполагается переменной.
7. K_3 – коэффициент, учитывающий естественную теплоотдачу шкафа при $\omega_B = 0$.
8. K_1 – коэффициент, учитывающий дополнительный теплоотвод в выбранной точке работы при среднем перегреве $\Delta t_{\text{оср}}$.
9. K_5 – коэффициент, учитывающий изменение теплоотвода при отклонении перегрева Δt_0 от среднего значения.
10. K_4 – коэффициент, учитывающий естественную теплоёмкость шкафа.
11. K_6 – коэффициент, учитывающий изменение теплоёмкости шкафа в зависимости от скорости вращения вентилятора.
12. Датчик температуры, в котором в качестве первичного измерительного преобразователя используется терморезистор; датчик первоначально преобразует изменение температуры на входе в изменение сопротивления на выходе с коэффициентом преобразования $K_{\text{дт}} = 0,213 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$ и постоянной времени $T_{\text{дт}} = 25 \text{ с}$, а затем изменение сопротивления в изменение напряжения с коэффициентом $K_{\text{от}} = 0,47 \text{ В}/\text{Ом}$.

3.3. Функциональная схема САР температуры

3.3.1. Функциональная схема САР температуры показана на рис. 3.7. Рассмотрим основные элементы схемы.

1.1. Объект управления – закрытый металлический шкаф с жалюзи, в котором находятся источники избыточного тепла, датчик температуры ДТ и вентилятор.

1.2. Блок сопряжения, с помощью которого осуществляется согласование выходного сигнала датчика температуры с входом АЦП.

1.3. Регулируемый частотный асинхронный электропривод на базе преобразователя частоты «ВЕСПЕР ЕІ–9001», в состав которого входят:

- асинхронный электродвигатель (АД);
- автономный инвертор напряжения (АИН);
- фильтр (конденсатор С);
- диодный (неуправляемый) мостовой выпрямитель (В);

- микросхемы драйверов, посредством которых происходит управление силовыми ключами на IGBT транзисторах в АИН;
- микропроцессорная система (МПС), осуществляющая общее управление преобразователем частоты;
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для связи МПС с внешними устройствами.

1.4. ЭВМ высшего уровня, осуществляющая программирование контроллера и управление им по последовательному интерфейсу RS232.

1.5. Контроллер на базе микроконтроллера INTEL 80C196KC используется либо как МПС управляющая технологическим параметром при подаче обратной связи на его вход, либо как МПС верхнего уровня для выработки сигнала задания на входе преобразователя частоты в случае реализации обратной связи по температуре через технологический регулятор преобразователя частоты.

ЭВМ также используется для обработки поступающей с контроллера информации и построения графиков переходных процессов по температуре.

По способу связи с ЭВМ высшего уровня рассматриваемая САР относится к системам **автономного** принципа действия, т.к. в рабочем режиме контроллер или технологический регулятор преобразователя частоты являются не только источником командной информации, но и выполняют функции сравнения и регулирования в контуре температуры.

Регулируемый асинхронный электропривод «ВЕСПЕР ЕІ-9001» состоит из двух конструктивно законченных устройств: вентиляторной установки и преобразователя частоты.

На основе сигнала задания и сигнала обратной связи микропроцессорная система электропривода «ВЕСПЕР ЕІ-9001», как уже указывалось, способна самостоятельно вырабатывать управляющий сигнал на скорость при работе в автономном режиме. Источником сигнала обратной связи служит датчик температуры.

3.3.2. Контроллер MCS196KC–20.01N представляет собой законченное перепрограммируемое устройство, включающее в себя минимальное количество функциональных блоков, необходимых для решения задач управления технологическим оборудованием, сбора, хранения и обработки информации.

Основные элементы контроллера:

- микроконтроллер;
- память программ ПП (Flash-память);
- ОЗУ данных;
- интерфейс связи с ЭВМ RS–232;
- интерфейс связи с технологическим оборудованием RS–485;

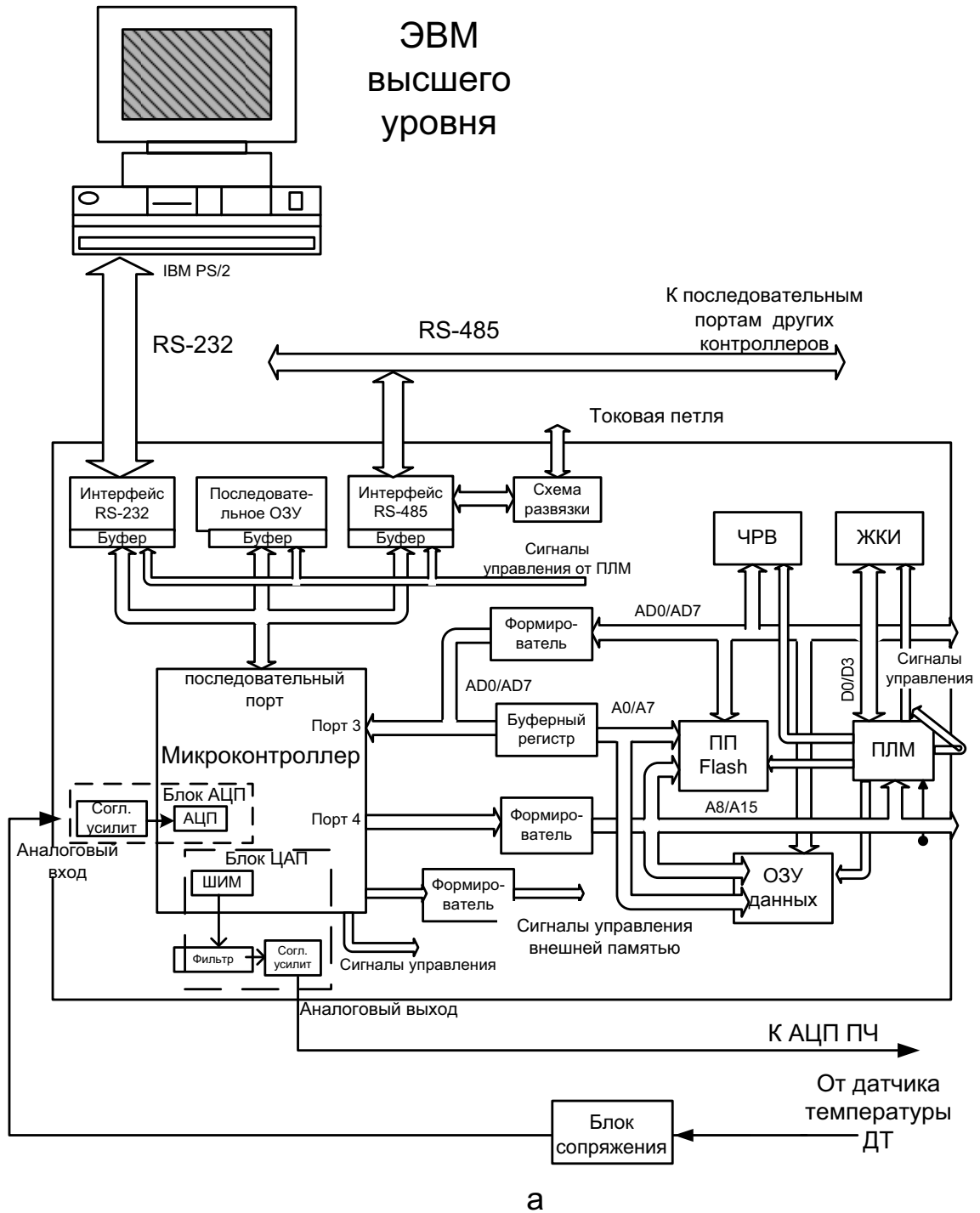
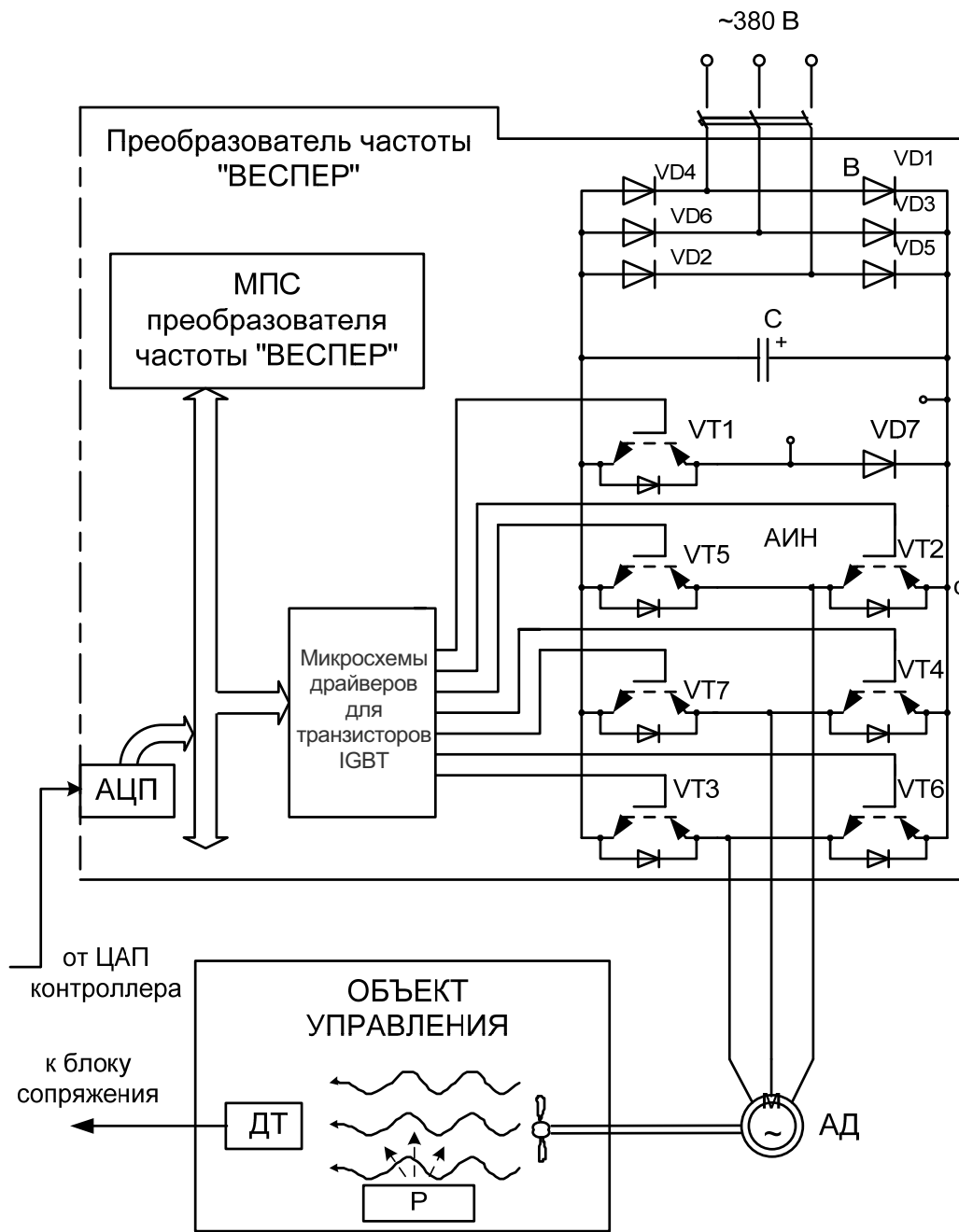


Рис. 3.7 а. Функциональная схема САР температуры: система управления верхнего уровня



б

Рис. 3.7 б. Функциональная схема САР температуры: электрофицированный объект управления

- программируемая логическая матрица ПЛМ;
- энергонезависимое ОЗУ с последовательным доступом;
- часы реального времени ЧРВ;
- жидкокристаллический индикатор ЖКИ;
- буферные усилители-формирователи;
- буферный регистр.

3.3.3. Частотный преобразователь EI-9001 с прямым цифровым управлением обеспечивает в дополнение к управлению соотношением напряжение/частота управление вектором потока для стандартных моделей асинхронных двигателей и одновременно может выполнять функции сравнения и коррекции с помощью встроенного алгоритма технологического регулятора.

Модель преобразователя частоты EI-9001 имеет четыре метода управления: векторное в разомкнутой системе; управление вектором поля; управление U/f с обратной связью от импульсного датчика (в дальнейшем – ИД); управление U/f. Метод управления выбирается оператором в соответствии с требованиями применения.

Для управления двигателем был выбран наиболее простой, эффективный и экономичный способ управления: изменение соотношения напряжение/частота по закону $U/f = \text{const}$.

3.4. Программа выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой организации системы.
2. Изучить особенности теплоинерционного объекта управления.
3. Изучить линеаризованную и нелинейную структурные схемы.
4. Ознакомиться с функциональным устройством установки.
5. Исследовать работу САР температуры в автономном режиме.
6. Исследовать работу САР температуры в неавтономном режиме.
7. Снять две кривые нагрева при разных скоростях вращения вентилятора и постоянной мощности нагревательных элементов.

3.5. Порядок выполнения работы

Лабораторная установка является сложным программно-аппаратным комплексом, поэтому высоки требования к правильности выполнения схемы соединений и установкам в программном обеспечении.

3.5.1. Соединение аппаратных средств

Схема соединения аппаратных средств зависит от режима работы установки – автономного или неавтономного.

1. Общими для обоих режимов являются следующие соединения.

Силовые соединения:

- ПЧ «Веспер» включается трёхфазной вилкой в сеть;
- кабель ПЧ «Веспер» с круговым штыревым разъёмом XS4 подключается к имитирующей установке в гнездо X4;
- ЭВМ запитывается от однофазной сети;
- кабель питания контроллера от источника включён в гнездо X10.

Информационные соединения:

- тумблер SA1 установки в верхнем положении «Веспер»;
- кабель в ПВХ-оболочке соединяет гнездо X3 установки с гнездом X11/X12 контроллера;
- кабель в коричневой резиновой оболочке круговым разъёмом подключается к гнезду X1 установки;
- соединения внутри контроллера показаны в Приложении 1;
- кабель соединяет приемопередатчики RS-232 ЭВМ и контроллера.

2. В **автономном режиме** электропривода (обратная связь по температуре подана на вход преобразователя частоты) тумблер SA2 переключен в нижнее положение.

Задание температуры производится непосредственно в ПЧ путём программирования с панели управления. Информация о температуре в формате (0...10) В подаётся на аналоговый вход АЦП преобразователя частоты с датчика температуры по информационной витой экранированной паре (в коричневой резиновой оболочке). Витая пара, с одной стороны, присоединяется к гнезду A5-X1 (Приложение 2), а с другой – к соответствующим клеммам информационного разъема преобразователя через дополнительно выведенную внешнюю панель. Общий провод витой пары (синий) присоединяется к клемме 17 на внешней панели, информационный (белый) – к клемме 16, экран соединяется с экранной клеммой 12.

3. В **неавтономном режиме** электропривода (обратная связь по температуре замыкается через контроллер) тумблер SA2 находится в верхнем положении. При этом функции цифрового управления контуром температуры осуществляются в контроллере. Поэтому на преобразователе частоты передается информация не о температуре, а напряжении задания на скорость вращения вентилятора от контроллера. Для этого используется та витая пара, по которой в автономном режиме осуществлялась передача напряжения, соответствующего температуре, от блока сопряжения датчика температуры на преобразователь частоты. Чтобы напряжение задания поступало на вход задания АЦП преобразователя частоты EI-9001, информационный провод (белый) этой витой пары соединяют с клеммой 13 внешней панели преобразователя.

3.5.2. Работа с программным обеспечением

1. Взаимодействие оператора с контроллером осуществляется в основном через ЭВМ.

Функционирование контроллера определяется главным образом вложенной в него программой. Программа может быть написана в любом стандартном текстовом редакторе. Как правило, программа состоит из основного файла с расширением **a96** и нескольких подключаемых файлов с расширением **inc**, в одном из которых и расположена главная часть алгоритма управления электроприводом. Обработка текста программы и программирование контроллера осуществляется с помощью оболочки «**Турбоконтроллер**», запускаемой программой **Turboctl.exe**.

Приём информации из контроллера выполняется под управлением программы **INCOM20.exe**. Эта программа принимает данные и записывает их в текстовый файл **F2.exe**. Данные могут быть обработаны в любом приложении, способном воспринять текстовый файл. В лабораторной работе для этой цели используется приложение «**Microsoft Excel**».

Перед запуском программы **INCOM20.exe** для избежания конфликта обращения к последовательному порту программа **Turboctl.exe** должна быть закрыта. Для удобства вызова и использования этих программ разработана оболочка-диспетчер «**Инспектор**», запускаемая программой **Inspector.exe**.

2. Как указывалось выше, при работе в неавтономном режиме, управление контуром температуры осуществляется контроллером в соответствии с загруженной в него программой. Текст программы, отвечающий за ввод параметров системы, показан на рис. 3.8.

Адаптация коэффициента усиления регулятора осуществляется для компенсации нелинейной мультиплексной обратной связи в канале охлаждения.

```
;УРОВЕНЬ СТУПЕНЧАТОГО ЗАДАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ Uzw
;Uzw_s=[0,100]дискрет (в градусах)   ld Uzw_s,#40
;*****
;ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ
;Выбор типа регулятора: 1-адаптивный ПИ-РТ
; 0-не адаптивный ПИ-РТ
  Adap SET 1
;*****
;ЗАДАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКР. СРЕДЫ (k2,град.) ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
;АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА
;*****
  ldb k2,#20
;Параметры регулятора (для неадаптивного ~10-50, для адаптивного ~100-500)
  ld kpt,#400
  ld Tpt,#50
```

Рис. 3.8

Блок-схема программы управления контуром температуры показана на рис. 3.9.

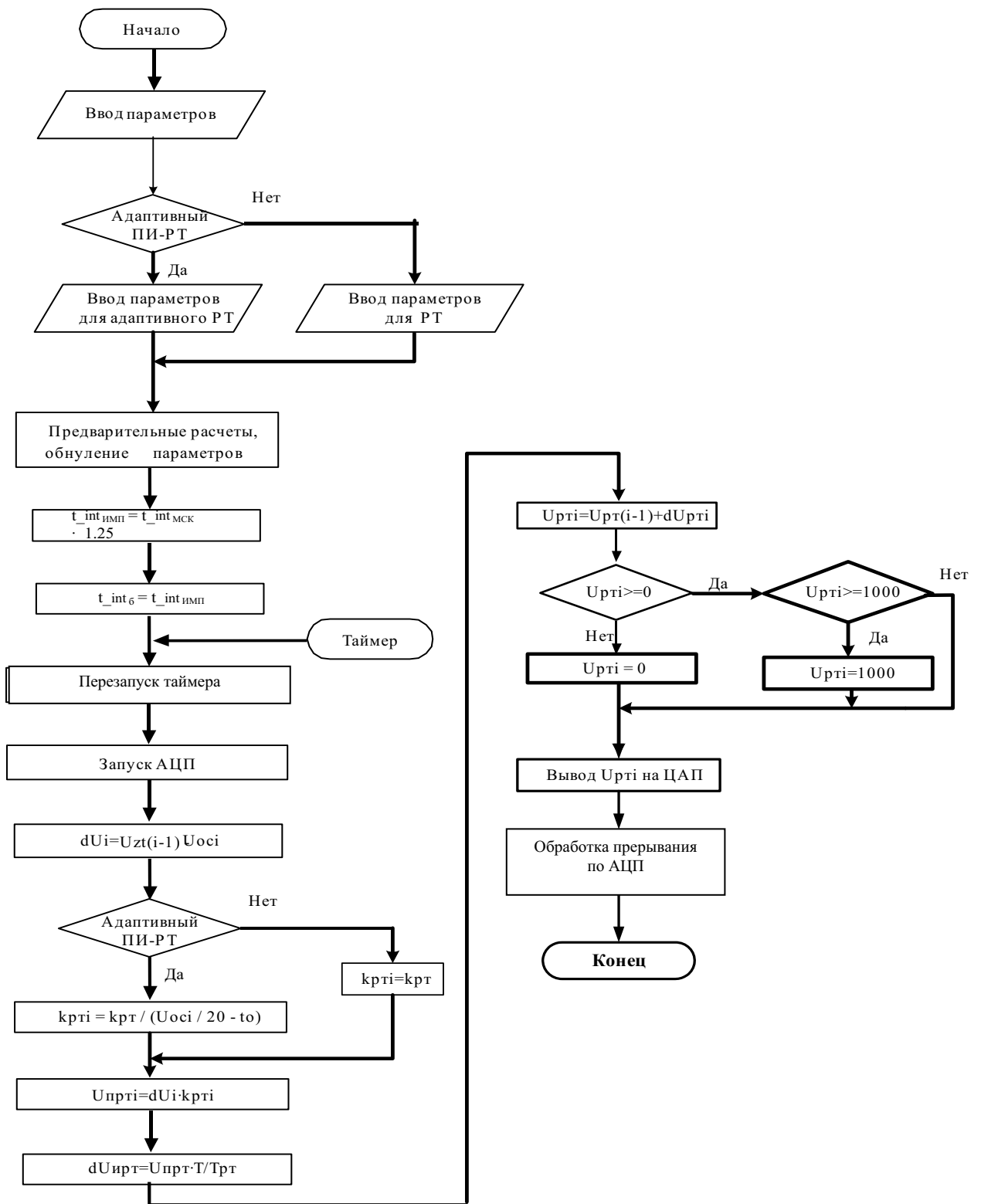


Рис. 3.9

3.5.3. Возможности применения преобразователя частоты «ВЕСПЕР» для управления контуром температуры

В преобразователе возможно ПИД – управление процессами с помощью встроенного технологического регулятора. В табл. 3.1 представлено описание константы В5–01, а на рис. 3.9 – блок-схема ПИД-регулятора. Для работы ПИД-регулятора необходимо, чтобы функция клеммы 16 (НЗ–05) была установлена на обратную связь для ПИД-регулятора (значение В).

Таблица 3.1

Константа В5-01

555-01	Функция ПИД-регулятора
0	ПИД-регулирование отключено
1	ПИД-регулирование включено (дифференциальное управление колебательностью)
2	ПИД-регулирование включено (дифференциальное управление уровнем обратной связи)

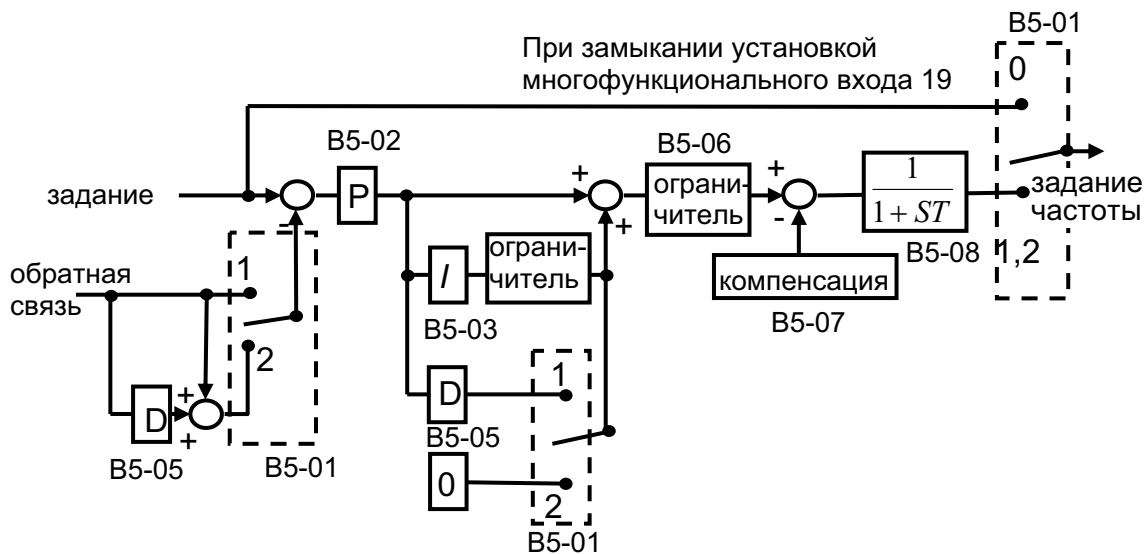


Рис. 3.9. Блок-схема встроенного ПИД-регулятора

3.5.4. Исследование работы САР температуры в автономном режиме

1. Осуществить схему соединений для автономного режима в соответствии с подразделом 3.5.1.
2. Включить ПЧ «Веспер» в сеть.
3. Перевести ПЧ «Веспер» в режим местного управления; установить закон управления « $U/f = \text{const}$ » или «Open Loop Vector».

4. Ввести следующие константы:
 В5–01= 2 (включение ПИД-регулятора);
 НЗ–05= В (использование клеммы 16 для ввода обратной связи);
 В5–02 (пропорциональная составляющая регулятора) и
 В5–03 (интегральная составляющая регулятора) – по заданию преподавателя.
5. Задать температуру из предположения, что заданию 0 дискрет соответствует 100 °С, а заданию 50 дискрет – 0 °С, т.е. в соответствии со следующим выражением $N(\text{диск})=(100 - t(^{\circ}\text{C}))/2$.
6. Включить тумблер SA3 на установке, введя в систему возмущение (источники избыточного тепла).
7. Запустить ПЧ «Веспер», нажав кнопку «Пуск» на его панели управления.
8. Для контроля за текущей температурой необходимо загрузить в контроллер программу, в верхней строке ЖК-индикатора будет высвечиваться температура в °С.

3.5.5. Исследование работы САР температуры в неавтономном режиме

1. Осуществить схему соединений для неавтономного режима в соответствии с подразделом 3.5.1.
2. Включить ПЧ «Веспер» в сеть.
3. Перевести ПЧ «Веспер» в режим дистанционного управления.
4. Ввести константу В5–01= 0 (отключить встроенный ПИД-регулятор).
5. Запустить программу «Инспектор».
6. Запустить программу «Турбоконтроллер».
7. Вызвать текстовый файл заданий, нажав кнопку «Inc-файл».
8. Сделать задание на температуру, выбрать параметры регулятора температуры по заданию преподавателя.
9. Закрыть текстовый файл и выполнить п. 4 подраздела 3.5.7.
10. Ввести источники избыточного тепла.
11. Снять кривые переходного процесса, руководствуясь пп. 5 ...7 подраздела 3.5.7.

3.5.6. Снятие кривых нагрева

1. Включить ПЧ «Веспер» в сеть.
2. Перевести ПЧ «Веспер» в режим местного управления.
3. Ввести константу В5–01= 0 (отключить ПИД-регулятор).
4. Ввести источники избыточного тепла.
5. Задать скорость вращения вентилятора непосредственно с пульта управления.
6. Снять кривые переходного процесса руководствуясь, пп. 5 ...7 подраздела 3.5.7.

3.5.7. Снятие переходного процесса температуры

1. Запустить программу «**Инспектор**». Через неё осуществляется доступ к программному обеспечению лабораторного стенда. Запустить программу можно с рабочего стола или с панели Меню. Ярлык программы имеет вид



2. Запустить программу «**Турбоконтроллер**».
3. Настройки этих программ должны соответствовать Приложениям 3 и 4.
4. Произвести аппаратный сброс системы, нажав соответствующую кнопку на передней панели корпуса контроллера. Далее необходимо произвести программный сброс системы, нажав кнопку «Сброс» на панели программы «**Турбоконтроллер**». Затем в диалоге «Сборка» нужно нажать кнопку «Сборка». Программа произведёт ассемблирование исходного текстового файла, компоновку, подготовит файл для пересылки в контроллер, сотрёт содержимое памяти контроллера и запишет новую программу. В случае необходимости будет выдано сообщение об ошибках и предупреждениях.
5. Нажать кнопку «Выполнить» на панели программы «**Инспектор**»; при этом закроется программа «**Турбоконтроллер**», запустится программа приёма данных **INCOM20.exe**.
6. После завершения приёма данных программа **INCOM20.exe** закроется; при желании можно убедиться в корректности приёма, открыв текстовый файл данных **F2.txt**.
7. Открыть в приложении **Microsoft Excel** текстовый файл **F2.txt**. По данным построить графики переходных процессов температуры и задания на скорость.

3.6. Контрольные вопросы

1. Назначение САР температуры?
2. Функции, выполняемые контроллером в рассматриваемой системе? Назначение преобразователя частоты?
3. Преимущества и недостатки автономного и неавтономного принципа построения системы регулирования?
4. Особенности управления объектом, у которого источник не регулируется?
5. Физический смысл теплоотдачи объекта?
6. Физический смысл теплоёмкости объекта?

7. Допущения, сделанные при рассмотрении объекта управления?
8. Основные специфические особенности объекта?
9. Поясните переход структурной схемы рис. 3.3, а к схеме рис. 3.3, з.
10. Почему структурная схема линеаризованной САР температуры составлена в приращениях?
11. Поясните физический смысл мультиплексной обратной связи по нелинейной структурной схеме.
12. Зачем нужен фильтр на входе САР температуры?
13. Почему датчик обратной связи представлен двумя звеньями?
14. Почему регулируемый электропривод можно представить безынерционным звеном?
15. Поясните назначение блока сопряжения по функциональной схеме.
16. Функции ЭВМ в автоматизированной системе?
17. Возможности встроенного технологического регулятора преобразователя частоты «Веспер»?
18. Как организована связь между компьютером и контроллером?
19. Как организован канал управления между контроллером и преобразователем?
20. Как организован канал обратной связи между объектом и контроллером?

3.10. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Линеаризованная схема САР температуры.
3. Нелинейная структурная схема системы.
4. Переходные процессы температуры в автономном режиме.
5. Переходные процессы температуры и задания на скорость в неавтономном режиме.
6. По двум кривым нагрева при разных скоростях вращения вентилятора оценить изменения теплоёмкости и теплоотдачи объекта управления.
7. Выводы по работе.

3.11. Список литературы

1. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 1. – Введение в технику регулирования линейных систем. Ч. 2. – Оптимизация контура регулирования: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 144 с.
2. Преобразователь частоты с управлением вектором потока EI-9001. Инструкция по эксплуатации. Часть 1, часть 2 (константы).

3. Козаченко В.Ф. Микроконтроллеры: руководство по применению 16-разрядных микроконтроллеров Intel MCS-196/296 во встроенных системах управления. – М.: Издательство ЭКОМ, 1997. – 688 с.
4. Микроконтроллер i8XC196KC/KD. Руководство пользователя. – Томск, 1996.
5. Паспорт на контроллер MC196.01. – Томск, 1998.
6. Сартаков В. Д. Микропроцессорное управление электроприводами: учебное пособие. Часть 1. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. – 165 с.
7. Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Исследование влияния отклонения напряжения на работу асинхронного двигателя

4.1. Цель работы

Исследование влияния отклонений напряжения на выводах потребителя электроэнергии (асинхронного двигателя) от номинального значения на потери мощности в двигателе, изменение $\cos \varphi$ и скорости вращения двигателя при различных его нагрузках.

4.2. Теоретические сведения

Изменения электрических нагрузок на промышленных предприятиях являются причиной отклонений и колебаний напряжения у потребителей электрической энергии. Отклонения напряжения оцениваются разностью фактического и номинального значения при детерминированном процессе или разностью среднего значения (математического ожидания) и номинального, усредненной за некоторый период времени.

Время усреднения обычно принимают равным рабочей смене, одним или нескольким суткам, неделе и даже месяцу. Если не принимаются меры по поддержанию отклонения напряжения в установленных ГОСТ 13109–87 (от -5% до $+5\%$ от U_n), то это приводит к народнохозяйственному ущербу.

У асинхронных двигателей составляющие ущерба связываются с дополнительными потерями в их элементах активной мощности, дополнительным потреблением реактивной мощности, сокращением срока службы изоляции, снижением производительности механизмов. Значение ущерба также зависит от коэффициента загрузки двигателя.

Рассмотрим влияние отклонения напряжения на составляющие и полные потери активной мощности в двигателе. Суммарные потери мощности в асинхронном двигателе $\Sigma P_{\text{дв}}$ (в дальнейшем будем называть просто потерями) состоят из магнитных потерь в пакете магнитопровода статора $\Sigma P_{\text{ст}}$, потерь в меди обмотки статора ΣP_1 , потерь в меди обмотки ротора ΣP_2 , механических потерь $\Sigma P_{\text{мех}}$ и дополнительных потерь $\Sigma P_{\text{доп}}$:

$$\Sigma P_{\text{дв}} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доп}} \quad (4.1)$$

В свою очередь,

$$\Delta P_1 = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1,$$

где I_1 – ток статора; r_1 – сопротивление обмотки статора.

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_0 - (\Delta P_{10} + \Delta P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{доп}}),$$

где ΔP_{10} – потери мощности в статорной обмотке при холостом ходе.

$$\Delta P_{10} = 3 \cdot I_0^2 \cdot r_1,$$

где I_0 – ток в обмотке статора при холостом ходе.

В практических расчетах допускается принимать:

$$\Delta P_{\text{доп}} = 0,005 P_{\text{н}};$$

$$\Delta P_{\text{мех}} = 0,01 P_{\text{н}}.$$

При номинальном напряжении на зажимах двигателя потери $\Delta P_{\text{ст}}$, $\Delta P_{\text{мех}}$ и $\Delta P_{\text{доп}}$ не зависят от нагрузки, а потери ΔP_1 и ΔP_2 изменяют свою величину в зависимости от нагрузки.

При изменении же напряжения на зажимах двигателя $\Delta P_{\text{ст}}$, ΔP_1 , ΔP_2 зависят от изменения подводимого напряжения. Не учитывая падения напряжения в обмотке статора асинхронного двигателя (АД), можно считать

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 W_1 f_1 K_{\text{об}} \Phi_{\text{м}}, \quad (4.2)$$

где E_1 – ЭДС статорной обмотки; W_1 – число витков статорной обмотки; f_1 – частота тока питающей сети; $K_{\text{об}}$ – обмоточный коэффициент; $\Phi_{\text{м}}$ – максимальный магнитный поток двигателя.

При уменьшении U_1 в n раз уменьшается E_1 , а следовательно, магнитный поток $\Phi_{\text{м}}$ и магнитная индукция $B_{\text{м}}$ двигателя во столько же раз. Потери в стали $\Delta P_{\text{ст}}$, пропорциональные B^2 , уменьшаются в n^2 раз (4.3):

$$\Delta P_{\text{ст}} = \sigma \cdot f_1 B^2. \quad (4.3)$$

где σ – постоянная, зависящая от сорта стали.

Ток холостого хода I_0 , определяемый по кривой намагничивания и зависящий от магнитного потока Φ , будет уменьшаться. Вращающий момент асинхронного двигателя M может быть определен по формуле (4.4)

$$M = K_M \Phi I_2' \cos \Psi_2, \quad (4.4)$$

где K_M – конструктивная постоянная двигателя; I_2' – приведенное значение тока ротора к току статора; $\cos \Psi_2$ – косинус угла сдвига фаз между \dot{E}_2 и \dot{I}_2 ; E_2 – ЭДС ротора.

При работе двигателя с нагрузкой, не превышающей номинальную, т.е. с малым скольжением, можно принять $\cos \Psi_2 \approx 1$. Тогда потери в роторе будут состоять только из потерь в меди его обмотки

$$\Delta P_2 = 3 (I_2')^2 r_2', \quad (4.5)$$

где r_2' – приведенное сопротивление обмотки ротора.

Уменьшение магнитного потока двигателя Φ в выражении (4.4) при моменте двигателя $M = \text{const}$ вызовет увеличение тока I_2' , и следовательно, потерь ΔP_2 . Скорость вращения ротора n_2 при этом уменьшится и двигатель будет работать на новой механической характеристике.

Рассмотрим далее изменение потерь в меди обмотки статора ΔP_1 . Из курса электрических машин известно, что ток статора I_1 определяется геометрической суммой тока холостого хода I_0 и приведенного значения тока ротора I_2' (рис. 4.1):

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2'). \quad (4.6)$$

Из этого выражения следует, что в зависимости от соотношения токов \dot{I}_0 и \dot{I}_2' между собой, ток I_1 может возрасть или уменьшаться, соответственно, будут возрастать или уменьшаться потери ΔP_1 при изменении U_1 . Так как в режиме холостого хода двигателя ток в обмотке статора \dot{I}_1 равен току холостого хода \dot{I}_0 , то при изменении питающего напряжения сети можно проследить изменение электрических потерь в обмотке статора:

$$\Delta P_1 = m \cdot I_1^2 \cdot r_1. \quad (4.7)$$

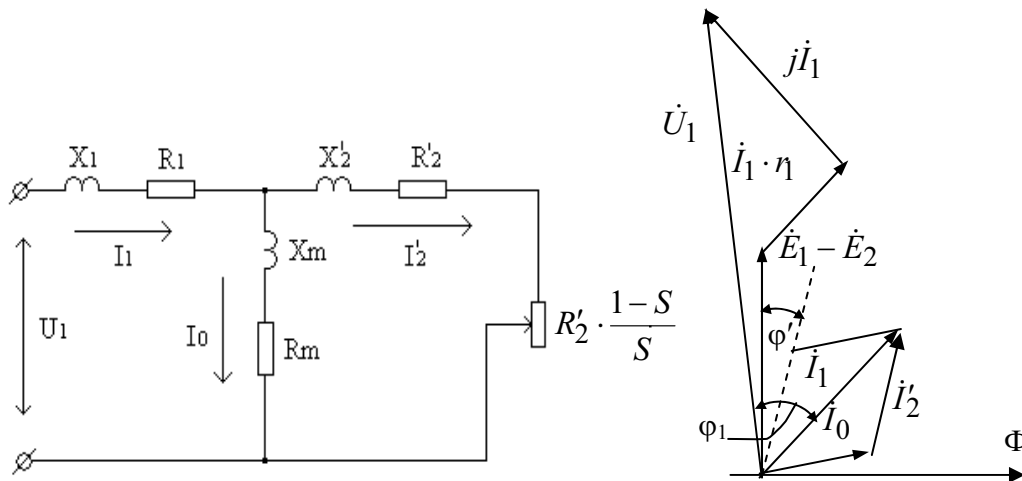


Рис. 4.1. Схема замещения и векторная диаграмма АД

Для определения I_1 опытным путем снимается характеристика холостого хода двигателя. По опыту х.х. и каталожным данным двигателя расчетным путем определяются следующие его параметры. По данным опыта х.х. определяются значения коэффициентов мощности для разных значений напряжения U_1 по формуле:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_1 I_0}, \quad (4.8)$$

где P_0 и I_0 – значения мощности и тока х.х. для разных значений U_1 (табл. 4.1).

По тригонометрическим таблицам находятся $\sin \varphi_0$ для тех же значений U_1 . Затем определяется приведенное значение угла тока ротора

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{K_3}{K_m K_H^2 + \sqrt{(K_m K_H^2)^2 - K_3^2}},$$

где $K_3 = \frac{P_{\text{текущ}}}{P_H}$ – коэффициент загрузки; $K_m = \frac{M_{\text{max}}}{M_H}$ – кратность максимального момента; для практических целей можно принять $K_m \approx 2$;

$K_H = \frac{U_1}{U_H}$ – кратность напряжения на зажимах двигателя (в расчетах принимается U_1 в пределах от 1,15 до 0,8 U_H).

По найденным значениям $\operatorname{tg} \varphi'$ определяют $\sin \varphi'$, $\cos \varphi'$ и угол φ' для всех коэффициентов загрузки заданного интервала изменений: $K_3 = (0,5-1,0)$. Для указанных K_3 и K_H определяется значение тока статора I_1 из выражения

$$I_1 = \sqrt{(I_0 \cos \varphi_0 + I_2' \cos \varphi')^2 + (I_0 \sin \varphi_0 + I_2' \sin \varphi')^2}. \quad (4.9)$$

Из этих же условий определяется номинальное значение приведенного тока ротора I_2' по формуле

$$I_{2H}' = \sqrt{\frac{2 K_m}{K_m + \sqrt{K_m^2 - 1}}} \cdot I_{1H} \cos \varphi_H, \quad (4.10)$$

где I_{1H} – номинальный ток статора исследуемого двигателя при U_H ; $\cos \varphi_H$ – номинальный коэффициент мощности асинхронного двигателя при U_H и I_{1H} (I_{1H} и $\cos \varphi_H$ – каталожные данные).

Находится значение приведенного тока ротора I_2'

$$I_2' = I_{2H}' \sqrt{K_3 \frac{K_m + \sqrt{K_m^2 - 1}}{\frac{K_m K_H^2}{K_3} \sqrt{\frac{(K_m K_H^2)^2}{K_3^2} - 1}}} = I_{2H}' K_3 \sqrt{\frac{K_m + \sqrt{K_m^2 - 1}}{K_m K_H^2 + \sqrt{(K_m K_H^2)^2 - K_3^2}}}. \quad (4.11)$$

Величина приведенного активного сопротивления обмотки ротора r_2' определяется по формуле

$$r_2' = \frac{U_{1H}^2 (1 - S_H)}{2 C_1 \cdot (P_H + \Delta P_{\text{мех}}) K_m \left[1 + \frac{C_1}{S_H (K_m + \sqrt{K_m^2 - 1})} \right]}, \quad (4.12)$$

где $C_1 \approx 1 + \frac{I_0}{2I_k} = 1,03$ – коэффициент, учитывающий соотношение сопротивлений цепи статора под нагрузкой и при холостом ходе; $I_{к.з}$ – ток короткого замыкания двигателя; $\Delta P_{\text{мех}} = 0,01P_{\text{н}}$; $S_{\text{н}} = \frac{n_0 - n_{\text{н}}}{n_0}$ – номинальное скольжение двигателя; n_0 – синхронная скорость вращения асинхронного двигателя; $n_{\text{н}}$ – номинальная скорость асинхронного двигателя (АД).

По найденным значениям I_1 и I_2' , r_1 и r_2' определяются потери в меди ротора ΔP_2 по формуле (4.5) и потери в меди статора ΔP_1 по формуле

$$\Delta P_1 = 3 I_1^2 r_1. \quad (4.13)$$

По данным опыта х.х. определяются потери в статорной обмотке при холостом ходе

$$\Delta P_{10} = 3 I_0^2 r_1. \quad (4.14)$$

Потери в стали находятся из выражения

$$\Delta P_{\text{ст}} = P_0 - (\Delta P_{10} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доп}}), \quad (4.15)$$

где $\Delta P_{\text{доп}} = 0,005 P_{\text{н}}$.

Потери механические и дополнительные принимаются неизменными и равными

$$\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доп}} = 0,015 P_{\text{н}}. \quad (4.16)$$

Опытно-расчетный метод позволяет определить отдельные составляющие и суммарные потери мощности в асинхронном двигателе при различных значениях U_1 и коэффициентах загрузки.

4.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из стенда, исследуемого двигателя, тахогенератора, генератора постоянного тока, потенциал-регулятора и мнемосхемы стенда. Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. 4.2.

На передней панели лабораторной установки размещены следующие приборы:

- 1) амперметр A для измерения тока в цепи статора исследуемого двигателя;
- 2) ваттметр kW для измерения потребляемой мощности двигателя из сети;
- 3) вольтметр V для измерения подводимого напряжения к зажимам двигателя;
- 4) тахогенератор n для контроля частоты вращения двигателя.

Кроме приборов контроля на панели стенда расположены:

- 1) автомат QF для подачи напряжения на стенд и включения потенциал-регулятора;

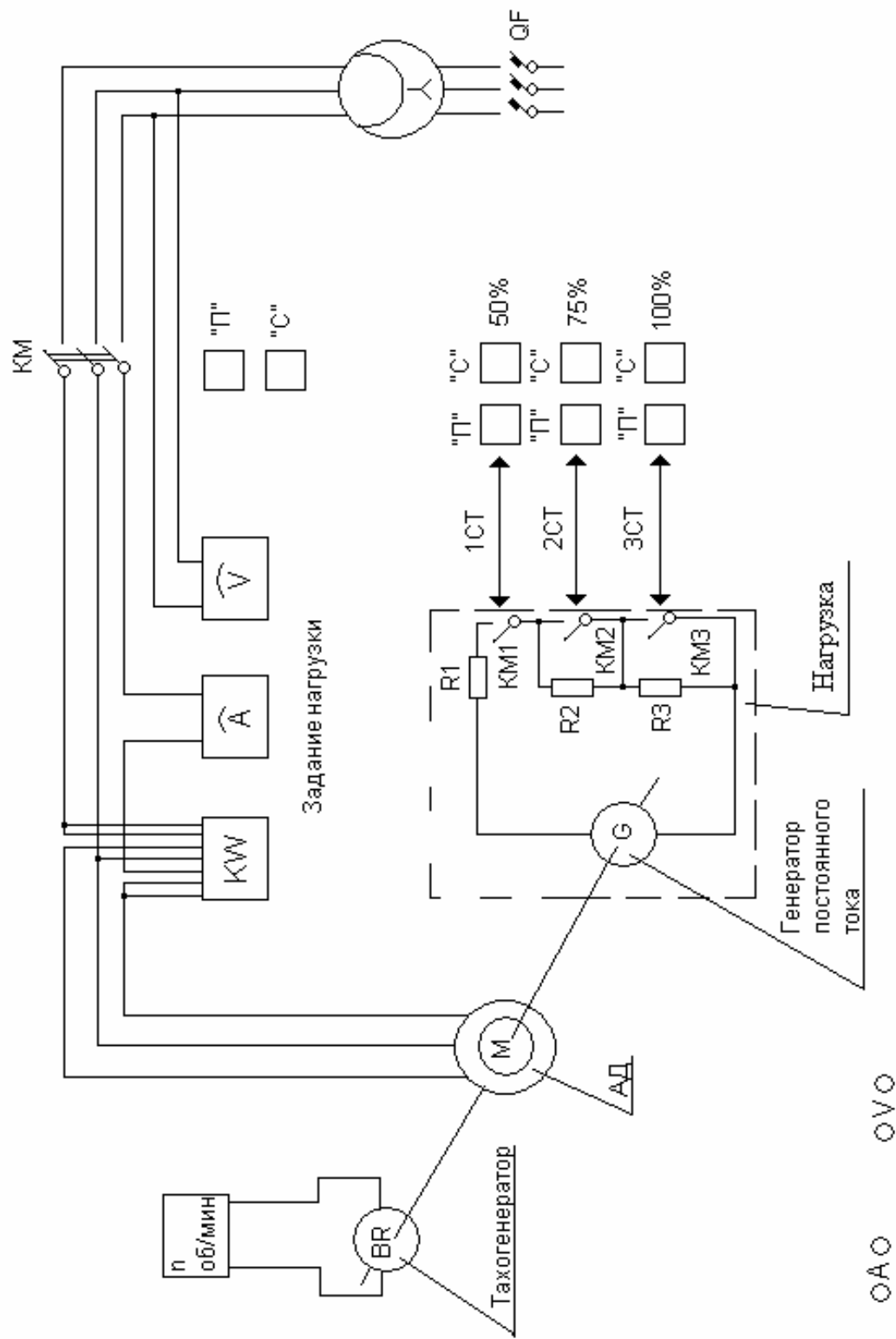


Рис. 4.2. Принципиальная схема лабораторной установки

- 2) магнитный пускатель КМ с кнопочной станцией $\frac{\text{«Пуск»(«П»)}}{\text{«Стоп»(«С»)}$

для пуска исследуемого двигателя;

- 3) потенциал-регулятор;

4) схема переменной нагрузки $R1 - R3$ и кнопочные станции «П» и «С» управления нагрузкой (50 %, 75 %, 100 %) генератора постоянного тока (нагрузочная машина).

4.3.1. Исследуемый двигатель

В качестве исследуемого двигателя в работе используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа А–32–4 со следующими паспортными данными: $P_n = 1$ кВт; $U_n = 380$ В (при соединении обмотки статора в «звезду»); $I_n = 2,4$ А; $n_n = 1450$ об/мин; $\eta_{дв} = 78,5$ %; $\cos\varphi = 0,79$.

Данные холостого хода исследуемого двигателя даны в табл. 4.1. Активное сопротивление одной фазы статора $r_1 = 0,4$ Ом.

Таблица 4.1

№ измер.	U_1 , В	I_0 , А	P_0 , Вт	n_n , об/мин
1	400	1,01	60	1450
2	390	1,0	59	1450
3	380	0,98	58,8	1450
4	370	0,95	58	1450
5	360	0,90	57,4	1450
6	350	0,84	56	1450
7	340	0,70	54	1450
8	320	0,60	50	1450
9	310	0,50	48	1450
10	300	0,40	46	1450

На одном валу с исследуемым асинхронным двигателем М находятся генератор постоянного тока, в цепь которого включена нагрузка $R1-R3$ и тахогенератор.

Генератор с нагрузкой $R1-R3$ служит для создания на валу исследуемого двигателя переменного (50 %, 75 %, 100 %) нагрузочного момента.

Данные генератора постоянного тока: тип ЭДН–1000 А; $U_n = 120$ В; $J_n = 5$ А.

4.3.2. Источник регулируемого напряжения

Для подачи на зажим исследуемого двигателя напряжения по величине большего или меньшего номинального в работе применяется индукционный регулятор (потенциал-регулятор) типа ИР–61–100 с пределом регулирования выходного напряжения 20–400 В. Регулирование величины выходного напряжения осуществляется вручную непосредственно штурвалом, находящимся на регуляторе и контролируется вольтметром V .

4.4. Порядок выполнения работы

К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности, усвоившие теоретический материал по данной теме и ознакомившиеся с оборудованием лабораторной установки.

4.4.1. Пуск и поддержание номинального режима

1. Проверить положение рычажка отключения автомата QF (рычажок отключения автомата должен быть в положении «отключено»).

2. Подать питание на стенд (по указанию преподавателя), при этом на панели стенда загорится зеленая лампочка с указателем номера стенда.

3. Включить автомат QF и установить потенциал-регулятором напряжение по вольтметру V равным 380 В.

4. Произвести пуск исследуемого асинхронного двигателя включением магнитного пускателя КМ нажатием кнопки «Пуск» («П»). Так как при пуске асинхронного двигателя напряжение на выходе регулятора может снижаться, то после окончания пуска напряжение потенциал-регулятором следует довести до 380 В.

5. После разгона исследуемого двигателя включить поэтапно нагрузку в цепь генератора постоянного тока:

- первая ступень 1СТ (50 %) – нажатием кнопки «Пуск» («П») магнитного пускателя КМ1;
- вторая ступень 2СТ (75 %) – нажатием кнопки «Пуск» («П») магнитного пускателя КМ2;
- третья ступень 3СТ (100 %) – нажатием кнопки «Пуск» («П») магнитного пускателя КМ3.

При включении каждой ступени нагрузки необходимо непрерывно поддерживать на зажимах двигателя напряжение 380 В.

6. Для каждой ступени нагрузки снять показания приборов, размещенных на панели стенда и занести их в табл.4.2.

После проведения опытов автоматом QF отключить лабораторную установку.

4.4.2. Проведение экспериментальных исследований

1. Для исследования влияние величины напряжения на работу асинхронного двигателя при 100 % загрузке необходимо:

- а) установить номинальный режим работы двигателя 3СТ (100 %);
- б) повысить напряжение на выходе индукционного регулятора до 400 В;

в) постепенно снижать напряжение на выходе индукционного регулятора до момента «опрокидывания» (точка опрокидывания отмечается по вольтметру V_1 , когда напряжение начинает непрерывно снижаться, а скорость падает почти до нуля).

Для предотвращения перегрева двигателя в самом начале процесса «опрокидывания» его сразу необходимо отключить при помощи кнопки «Стоп» магнитного пускателя КМ. После остановки двигателя следует нажатием кнопок «Стоп» пускатели КМ2 и КМ3 для нагрузок (75 %) и (100 %) установить на минимальные значения нагрузки.

При проведении исследований по п. 1 значения напряжения необходимо устанавливать через 20 В и снимать соответственно этим значениям напряжения, значения токов статора, мощности и скорости вращения. Показания заносить в табл. 4.2.

2. Произвести исследования, аналогичные п.1 при нагрузках двигателя 0,5 и 0,75 от номинальной. Процент загрузки устанавливается включением магнитных пускателей ступеней 1СТ и 2СТ, соответственно. Результаты исследований также занести в табл. 4.2.

4.5. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Принципиальную схему лабораторной установки.
2. Паспортные данные электрических машин, измерительных приборов, аппаратуры управления и регулирования.
3. Основные расчетные формулы.
4. Таблицу с опытными и расчетными данными (в соответствии с табл. 4.2).

Таблица 4.2

№ измер.	Опытные данные				Расчетные данные	
	U_1 (В)	I_1 (А)	$P_{\text{потреб}}$ (Вт)	n (об/мин.)	$\cos\varphi$ (отн.ед.)	$\Sigma\Delta P$ (Вт)
$K_3 = 100\%$						
1	400					
2	380					
3	360					
$K_3 = 0,7$						
1						
2						
3						
$K_3 = 0,5$						
1						
2						
3						

5. Графики:

а) кривые изменения потерь мощности, мощности и тока от напряжения

$$\Sigma \Delta P_{\text{дв}} = f(U_1); P = f(U_1); I_1 = f(U_1);$$

б) кривые изменения скорости двигателя от напряжения сети до момента «опрокидывания»

$$n = f(U_1);$$

в) кривые изменения момента «опрокидывания» от напряжения

$$M_{\text{опр}} = f(U_1);$$

г) кривые изменения коэффициента мощности двигателя от изменения напряжения и загрузки

$$\cos \varphi = f(U_1),$$

при $K_3 = 1,0; K_3 = 0,75; K_3 = 0,5;$

$$\cos \varphi = f(K_3),$$

при $U = \text{пост.}$

Коэффициент мощности можно определить по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} U_1 I_1}.$$

6. Анализ графиков, указанных в п.5, выводы по результатам опытов.

4.6. Контрольные вопросы

1. Из каких составляющих складываются суммарные потери электродвигателей?
2. Объясните принцип компенсации реактивной мощности электродвигателей и типы применяемых для этого устройств.
3. Как изменяется $\cos \varphi$ асинхронного двигателя при его недогрузке?
4. Из чего состоят переменные потери в нерегулируемом по скорости асинхронном двигателе?
5. Как вычислить или замерить потери мощности в электродвигателе?

4.7. Список литературы

1. Федоров А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1984.
2. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – М.: Энергия, 1977.
3. Радин В.И. и др. Электрические машины. Асинхронные машины: учеб. для электромехан. специальностей вузов / под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 1988.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМЫХ ИНВЕРТОРОВ

5.1. Цель работы

Изучение принципа действия различных схем зависимых инверторов, работающих на активно-индуктивную нагрузку, как преобразователей и потребителей электроэнергии.

5.2. Теоретические сведения

Преобразование постоянного тока в переменный (инвертирование) в последнее время все чаще находит применение в различных областях техники. Зависимое инвертирование, когда преобразованная энергия поступает в сеть переменного тока, а коммутация вентилей инвертора происходит под действием напряжения этой сети, открыло пути к решению ряда ключевых проблем энергетики. К этим проблемам относятся: осуществление рекуперации электроэнергии, получаемой на тяговых подстанциях, в питающую сеть переменного тока. Стало возможным питание от вентильных преобразователей мощных реверсивных и регулируемых электроприводов, работа которых характеризуется периодическим потреблением и отдачей (при торможении) электроэнергии. Стала также возможной передача электроэнергии постоянным током на дальние расстояния. Кроме того, инверторный режим используется в преобразователях частоты для возвращения энергии, накопленной в индуктивной нагрузке в сеть. Перечисленные задачи, а также ряд других технических вопросов, связанных с потребителями и преобразователями электроэнергии, реально смогли быть решены только с появлением полупроводниковых вентилей – тиристоров.

В данной лабораторной работе исследуются однофазная однополупериодная, однофазные двуполупериодные со средней точкой и мостовая, трехфазная с нулевым выводом, трехфазная мостовая схемы инвертирования на тиристорах.

5.2.1. Однофазная однополупериодная схема зависимого инвертора

Передача электроэнергии от одного источника к другому происходит тогда, когда ток от отдающего источника направлен навстречу ЭДС источника, принимающего эту энергию. В схеме рис. 5.1, представляющей

собой простейшую схему зависимого инвертора, энергия от источника постоянного тока E_d будет передаваться в сеть переменного тока тогда, когда ЭДС сети e_2 направлена навстречу току i_d , протекающему в схеме.

С этой целью тиристор T открывают в точке θ_1 , когда $E_d > e_2$. Благодаря индуктивности L_d ток сглаживается и не прекращается в точке θ_2 , когда $E_d = e_2$, а за счет накопленной в L_d энергии протекает до точки θ_3 , когда $E_d < e_2$. Далее процесс повторяется с периодом 2π .

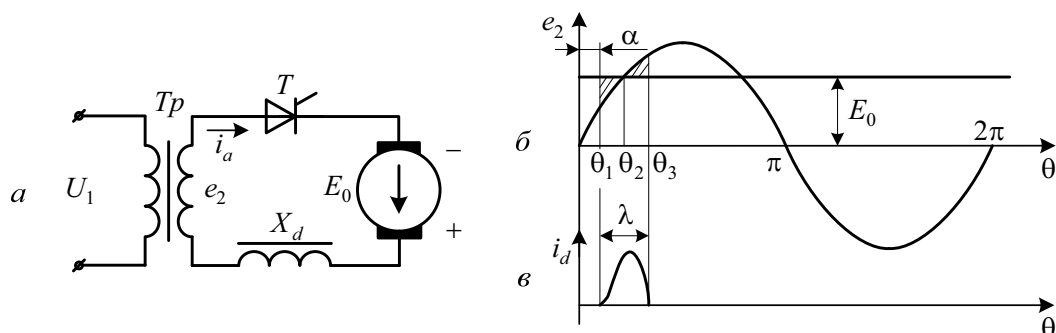


Рис. 5.1

5.2.2. Однофазная двухполупериодная схема со средней точкой

На рис. 5.2, а, б, в, г приводится принципиальная схема и линейные диаграммы напряжений и токов инвертора. Вентиль T_1 , присоединенный к фазе «а», при положительном напряжении преимущественно заперт, отпирается только в момент θ_1 – к концу положительного полупериода; до этого момента открыт T_2 , присоединенный к обмотке «б», напряжение которой отрицательно. В момент θ_1 потенциал на аноде открытого вентиля T_1 более положителен, чем на аноде открытого вентиля T_2 , и поэтому вентиль T_1 открывается и начинается переход тока с вентиля T_2 на вентиль T_1 , т. е. так называемый процесс коммутации.

Продолжительность коммутации тока принято обозначать углом γ , и зависит она от количества энергии, запасаемой в X_a – индуктивным сопротивлением рассеивания фазы трансформатора Tr . Из диаграммы видно, что коммутирующим напряжением является линейное напряжение сети переменного тока, трансформируемое трансформатором Tr . После коммутации ток в вентиле T_1 будет определяться алгебраической суммой переменного напряжения на фазе «а» и входного постоянного напряжения E_0 . Сначала от момента θ_2 эти напряжения складываются,

затем, когда напряжение e_2 становится отрицательным – от момента π до момента θ_3 , действует разность $(E_0 - e_{2a})$. Ток в вентиле T_1 за счет действия индуктивности сглаживающего реактора X_d продолжается и после этого (после точки θ_3). Продолжительность протекания тока по вентилю определяется количеством накопленной энергии в дросселе, которая пропорциональна заштрихованной площадке над линией E_0 . Отдача этой энергии происходит после момента θ_3 . Ток, представленный на диаграмме, показан идеально сглаженным ($X_d = \infty$).

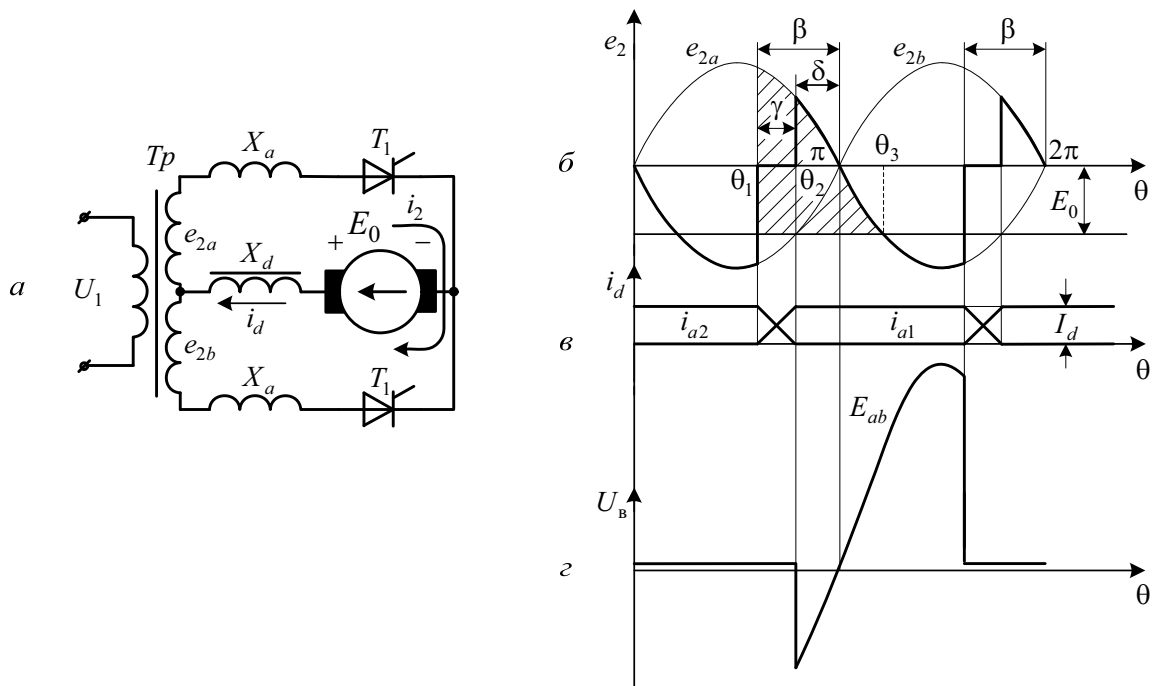


Рис. 5.2

Коммутация должна закончиться таким образом, чтобы закрывающийся вентиль успел восстановить свои управляющие свойства до момента π , так как позднее потенциал на аноде закрывшегося вентиля становится положительным относительно анода вентиля открытого (рис. 5.2, г). Если к этому моменту управляющие свойства выходящего из работы вентиля еще не восстановлены, то под действием прямого напряжения он снова откроется, что приведет к возникновению аварийного режима, называемого «опрокидыванием инвертора» или «срыв инвертирования».

Инвертор выйдет из режима – «опрокинется», т. к. в контуре инвертора все время будет действовать сумма переменного и постоянного напряжений, что приведет к протеканию больших аварийных токов.

Из сказанного вытекает следующее условие устойчивой работы инвертора: $\beta \geq \gamma + \omega t_{\text{восст}}$ или $\beta - \gamma = \delta \geq \omega t_{\text{восст}}$, где β – угол управления, отсчитываемый от точки пересечения фазовых напряжений в сторону опе-

режения; δ – угол, предоставляемый для восстановления управляющих свойств вентиля или угол запаса. Отсюда видно, что начало коммутации должно происходить с некоторым опережением относительно момента равенства фазовых напряжений, что предопределяет сдвиг фаз между преобразованным током и переменным напряжением и, следовательно, потребление реактивной мощности от источника переменного напряжения.

5.2.3. Однофазная мостовая схема зависимого инвертора

Пусть до момента $\theta = 0$ были включены вентили T_1 и T_3 . При условии $X_d = \infty$, а $X_a \neq 0$ токи в вентилях будут иметь вид, показанный на рис. 5.3, в. Для коммутации тока с вентилями $T_1 - T_3$ на вентили $T_2 - T_4$ в точке $(\pi - \beta)$ открываются вентили $T_2 - T_4$ и ток вентилях $T_1 - T_3$ в течение угла γ снижается до 0, а ток вентилях $T_2 - T_4$ нарастает за этот же период до тока I_d . Так же, как и в предыдущей схеме угол δ является углом восстановления управляющих свойств вентилях или углом запаса. На рис. 5.3, г изображена форма напряжения на вентилях $T_1 - T_3$.

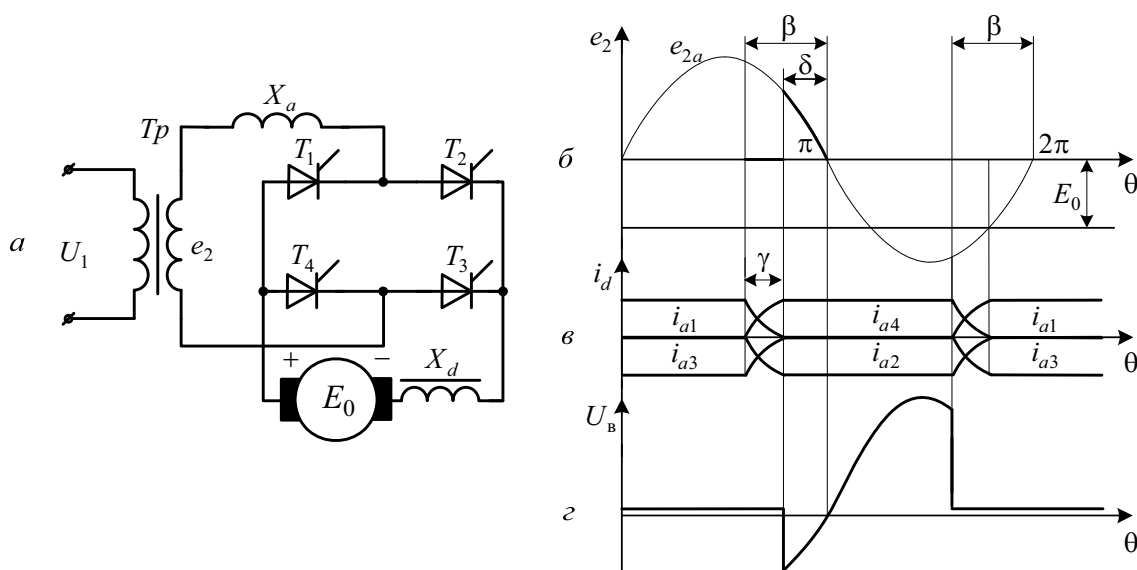


Рис. 5.3

5.3. Основные характеристики зависимых инверторов

Из линейных диаграмм напряжений и токов зависимого инвертора (например, рис. 5.3, б) видно, что навстречу постоянному напряжению постоянного тока действует напряжение сети переменного тока; напряжения сменяются по мере перехода тока с вентиля на вентиль. В зависимости от момента включения вентиля (угла β) изменяется участок

синусоиды, представляющий мгновенные значения противодействующего напряжения в интервале проводимости вентиля.

Во время коммутации значения противоЭДС отличаются от значений синусоиды переменного напряжения, так как спадающий ток в фазе закрывающегося вентиля наводит ЭДС положительного знака, а на фазе открывающегося вентиля наводится ЭДС отрицательного знака, складывающаяся с отрицательным напряжением фазового напряжения и тем самым увеличивающая противоЭДС, действующую навстречу E_d . Между мгновенными значениями входного напряжения U_{di} , противоЭДС и падениями напряжения устанавливается баланс:

$$U_{di} = U_{\phi} + U_{\gamma} + U_a + U_R, \quad (5.1)$$

где U_{γ} , U_a , U_R – мгновенные значения коммутационного падения напряжения, падения напряжения в вентиле и активном сопротивлении, соответственно.

Этот баланс можно распространить и на средние значения величин, входящих в предыдущее уравнение:

$$U_{di} = U_{i0} \cos \beta + \Delta U_{\gamma} + \Delta U_a + \Delta U_R, \quad (5.2)$$

где $U_{i0} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} U_2$ – идеальное значение среднего выпрямленного напряжения вторичных напряжений трансформатора инвертора при $\beta = 0$;

$\Delta U_{\gamma} = \frac{m}{2\pi} I_d X_a$ – среднее значение коммутационного падения напряжения.

Подставив эти значения в уравнение (5.2), получим уравнение входной характеристики зависимого инвертора $U_{di} = f(I_d)$:

$$U_{di} = \frac{\sqrt{2}m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} U_2 \cos \beta + \frac{m}{2\pi} I_d X_a + I_d R + \Delta U_a. \quad (5.3)$$

Уравнение (5.3) составлено для случая, когда $X_d = \infty$. Входные характеристики, соответствующие этому уравнению, представлены на рис. 5.6, а. Уравнение и вид входных характеристик при $X_d \neq 0$ и $X_d = 0$ будет несколько отличаться от вышеизложенного (рис. 5.6, б).

При увеличении входного напряжения U_d увеличивается также входной ток I_d , что приводит к уменьшению угла δ :

$$\beta = \gamma + \delta,$$

и, как следствие, к уменьшению угла восстановления управляющих свойств вентилях. В результате этого, когда угол δ станет меньше минимально допустимого угла $\delta_{\min} = \theta_{\text{восст}}$, произойдет опрокидывание инвертора. Причем, чем больше значение угла β , тем больше допустимое зна-

чение угла γ , а следовательно, и тока I_d . Допустимые значения тока I_d определяются с помощью ограничительной характеристики $U_{di} = f(I_{dкр})$.

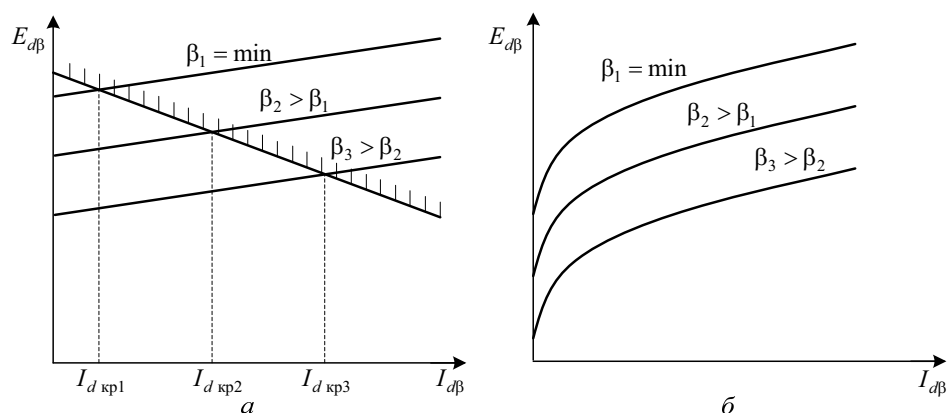


Рис. 5.6

Аналитически ограничительная характеристика зависимого инвертора определяется выражением:

$$U_{di} = \frac{\sqrt{2}m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} U_2 \cos \delta_{\min} - \frac{m}{2\pi} I_d X_a. \quad (5.4)$$

Эта характеристика изображена на рис. 5.6, а пунктирной линией.

5.4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством лабораторного стенда. Перед началом работы установить следующие положения ручек и переключателей:
 - тумблер «ЗИ – УВ» установить в положение «ЗИ»;
 - переключатели Π_1 и Π_2 выставить в крайнее левое положение;
 - ручка потенциометра угла управления « $\alpha - \beta$ » переключается в крайнее левое положение;
 - движок потенциометра R_d в среднее положение.
2. При помощи соединительных проводников собрать исследуемую схему (рис. 5.7–5.9).
3. После проверки схемы преподавателем включить питание стенда тумблером «Сеть», а тумблером «СУ» включить систему управления. Положения переключателя Π_1 при исследовании различных схем должны быть в соответствии с табл. 5.1.

Таблица 5.1

Положение Π_1	1	2	3	4	5
Схема	рис. 7	рис. 8	рис. 9	рис. 10	рис. 11

4. Для всех исследуемых схем необходимо снять семейство входных характеристик $U_d = f(I_d)$, плавно изменяя потенциометром R_d входное напряжение. Различные значения угла опережения β при этом устанавливать ручкой « $\alpha - \beta$ » по указанию преподавателя. Семейства входных характеристик снимать для различных значений индуктивности L_d (от $L_d = 0$ до $L_d = \max$). Изменение величины L_d осуществляется переключателем Π_2 .
5. Для всех исследуемых режимов снять осциллограммы токов и напряжений вентилей инвертора, источника питания.
6. Указанные преподавателем осциллограммы обработать, указав на них характерные точки: углы β , γ , δ , интервал проводящего состояния вентилей.
7. Для режима, указанного преподавателем, построить ограничительную характеристику, учитывая, что время восстановления управляющей способности вентилей $t_{\text{восст}} = 100 \cdot 10^{-6}$ с, а индуктивное сопротивление обмотки фазы силового трансформатора $X_a = 0.2 \cdot 10^{-3}$ Гн.
8. По окончании работы выключить питание системы управления, питание стенда, а все ручки и переключатели вернуть в исходное положение см. (п. 1).

5.5. Схемы исследуемых зависимых инверторов

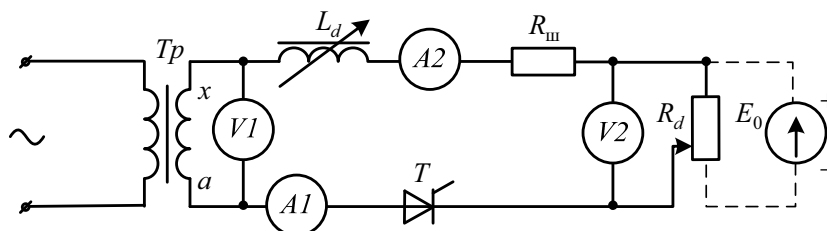


Рис. 5.7

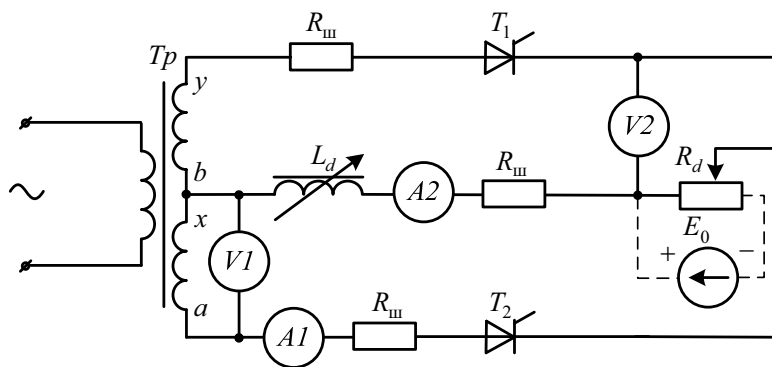


Рис. 5.8

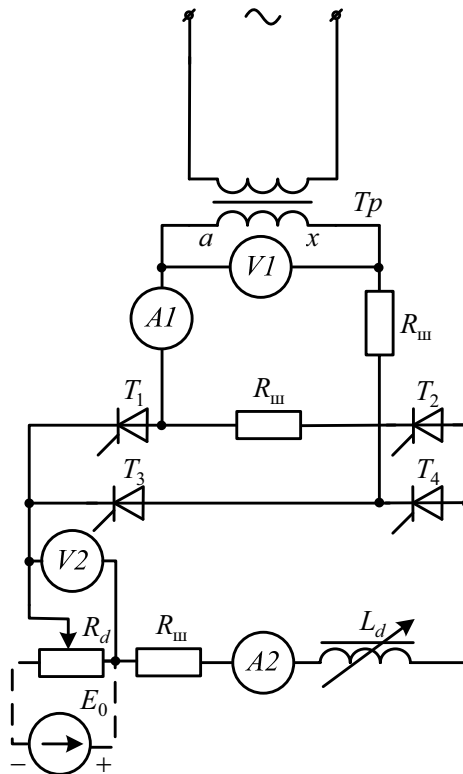


Рис. 5.8

5.6. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схемы исследуемых инверторов.
3. Экспериментальные входные характеристики инверторов $U_{d\beta} = f(I_{\alpha\beta})$, построенные для различных значений угла β и различных значений индуктивности L_d .
4. Осциллограммы токов и напряжений для различных решений работы.
5. Выводы по проделанной работе.

5.7. Контрольные вопросы

1. Какие условия необходимо выполнить для перевода вентильного преобразователя из выпрямительного режима в инверторный?
2. Как осуществляется коммутация вентилей в схемах зависимых инверторов?
3. Почему входная характеристика зависимого инвертора имеет восходящий характер?
4. Как строится ограничительная характеристика зависимого инвертора?

5.8. Список литературы

1. Петрович В.П., Воронина Н.А. Силовые преобразователи электрической энергии. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 255 с.
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
3. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК. – СПб.: Учитель и ученик: Корона принт, 2002. – 304 с.
4. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1980. – 423 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ПЛАВНОГО ПУСКА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ТИРИСТОРНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НАПРЯЖЕНИЯ

6.1. Цель работы

Получить практические навыки настройки тиристорного пускового устройства «MCD3000» питающего асинхронный двигатель, как основной потребитель электрической энергии, исследовать возможности энергосбережения в асинхронном электроприводе с тиристорным пусковым устройством в условиях мягкого пуска.

6.2. Теоретические сведения

Электромеханические переходные процессы в электроприводе описываются уравнением движения. Для случая $J_{\Sigma} = \text{const}$

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (6.1)$$

где M – момент, развиваемый двигателем; M_c – приведенный к валу двигателя момент сопротивления нагрузки; J_{Σ} – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции электропривода; ω – угловая скорость электропривода; t – время.

Электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем, определяется в соответствии с выражением

$$M = \frac{m_c \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot s_j \left[X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_j} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_j \cdot X_{\text{мн}} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}. \quad (6.2)$$

Механическая характеристика, построенная по (6.2), приведена на рис. 6.1.

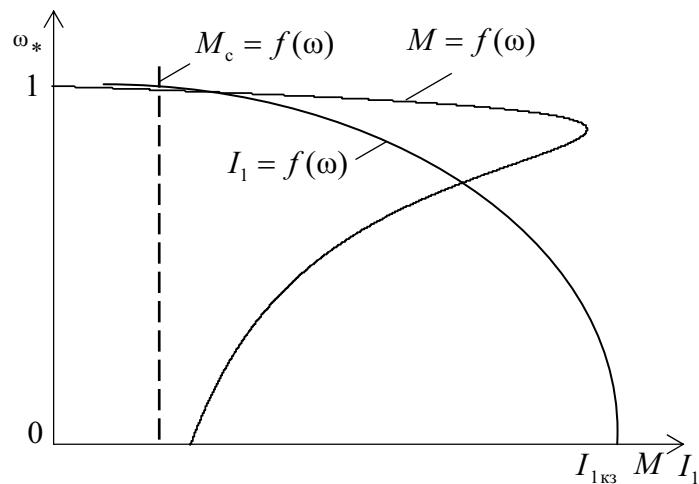


Рис. 6.1. Механическая $M = f(\omega)$ и электромеханическая $I_1 = f(\omega)$ характеристики асинхронного двигателя

Статическая механическая характеристика асинхронного двигателя благоприятна для пусков двигателей прямым включением в сеть. Поскольку пуск двигателя происходит достаточно быстро, то кратковременная перегрузка по току даже в 6 – 8 раз не опасна для него: ни с точки зрения больших ударных динамических моментов, ни с точки зрения больших пусковых токов $I_{1кз}$, которые много меньше пусковых токов естественной характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения той же мощности. Ограничения на прямой пуск асинхронных двигателей накладываются не самим двигателем, а питающей сетью.

Если сеть имеет ограниченную мощность или большое внутреннее сопротивление, то пусковые токи двигателя будут вызывать в этой сети большие падения напряжения. Естественно, что это скажется на режимах работы других потребителей энергии. По правилам Ростехнадзора напрямую можно запускать асинхронные двигатели, если их мощность

$$P_{дв} \leq 0,25 \cdot P_{сети}, \quad (6.3)$$

где $P_{сети}$ – мощность питающего трансформатора подстанции, в том случае, если от сети не питается осветительная аппаратура.

При питании осветительной аппаратуры от общей сети асинхронный двигатель можно пускать прямым включением в сеть, когда

$$P_{дв} \leq 0,05 \cdot P_{сети}. \quad (6.4)$$

Если условия (6.3) и (6.4) не выполняются, то способы токоограничения вытекают из уравнения для тока короткого замыкания ротора асинхронного двигателя:

$$I'_{2кз} = \frac{U_{1j}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}}. \quad (6.5)$$

На практике нашли широкое применение следующие основные способы уменьшения тока короткого замыкания $I'_{2кз}$:

- пускатели, обеспечивающие переключение со звезды на треугольник;
- пускатели с трансформаторами или автотрансформаторами;
- устройства для пуска двигателя с добавочными активными сопротивлениями в цепи обмотки статора;
- устройства для пуска двигателя с добавочными индуктивными сопротивлениями в цепи обмотки статора;
- устройства плавного (мягкого) пуска.

Пуск посредством переключения со звезды на треугольник представляет собой самые недорогие устройства, ограничивающие пусковой ток, они не лишены недостатков. Наиболее значительные недостатки заключаются в следующем:

- отсутствует контроль за уровнем понижения тока и вращающего момента;
- в момент переключения пускателя со звезды на треугольник обычно отмечаются высокие переходные значения тока статора и электромагнитного момента асинхронного двигателя. Из-за этого возникают электрические и механические перегрузки, которые часто приводят к выходу из строя оборудования. Перегрузки в момент переключения возникают вследствие того, что при отсоединении асинхронного двигателя от питающей сети он переходит в режим генератора и напряжение на его выходе может иметь ту же амплитуду, что и напряжение питающей сети. Это напряжение еще сохраняется при повторном подключении асинхронного двигателя к сети по схеме «треугольник» и может оказаться в противофазе к питающему напряжению. В результате возникает ток ротора, почти вдвое превышающий ток короткого замыкания, определяемый по (6.5). Пусковой момент в это же время превышает первоначальный момент в четыре раза.

Пуск с помощью автотрансформатора (или трансформатора) представляет больше возможностей по контролю тока статора и момента на валу двигателя, но и в этом случае переключения осуществляются ступенчато. Пуск асинхронного двигателя при помощи автотрансформатора имеет следующие недостатки:

- броски тока и момента, обусловленные ступенчатым переключением напряжения;
- ограниченное число ступеней выходного напряжения автотрансформатора, которые не позволяют обеспечить оптимальную величину пускового тока;

- высокая стоимость пусковых устройств, пригодных для использования в условиях частого или продолжительного пуска, прежде всего за счет стоимости автотрансформатора.

Реостатный пуск с последующим выводом пусковых сопротивлений цепи обмотки статора также представляет больше возможностей по управлению процессом пуска, чем пускатели с переключением со «звезды» на «треугольник». Тем не менее, они также не лишены недостатков:

- сложности оптимизации процесса пуска при вводе схемы в эксплуатацию, поскольку значения пусковых сопротивлений определяются при изготовлении пускателя и впоследствии их трудно изменить в большую сторону;
- неоднозначные механические характеристики в условиях частого пуска, поскольку значения сопротивлений меняются при их нагреве. Для охлаждения резисторов необходим длительный промежуток времени между пусками;
- дополнительные потери мощности на пусковых сопротивлениях и как следствие пониженный коэффициент полезного действия электропривода;
- недостаточная эффективность работы при пуске в тяжелом режиме или при продолжительном пуске, поскольку нагревание вызывает изменение сопротивления резисторов.

Если учитывать электромагнитные инерционности асинхронного двигателя, то расчетный график динамической механической характеристики маломощного асинхронного двигателя при пуске будет иметь вид, приведенный на рис. 6.2.

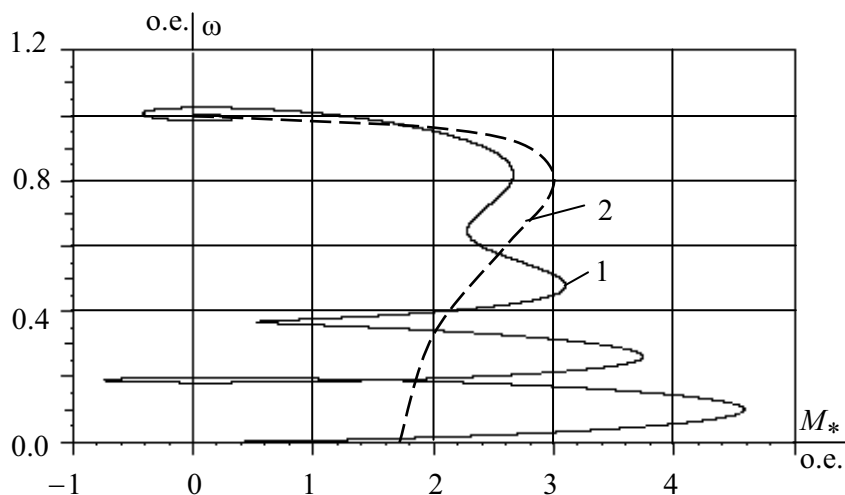


Рис. 6.2. Механические характеристики короткозамкнутого асинхронного двигателя: 1 – динамическая; 2 – статическая

Анализ динамической механической характеристики асинхронного двигателя показывает, что максимальные ударные моменты при пуске превышают критический момент M_k статической механической характеристики более чем в 1,5 раза и могут достигать недопустимо больших по механической прочности значений. Ударные моменты при пуске и, особенно при реверсе асинхронного двигателя, приводят к выходу из строя кинематики производственных механизмов и самого асинхронного двигателя.

Увеличение момента инерции электропривода J_Σ приводят к затягиванию переходных процессов и к еще большей колебательности в начальной части динамической механической характеристики (рис.6.3).

Одна из эффективных возможностей повышения надежности и экономичности работы электроприводов с асинхронными двигателями связана с использованием в их структурах тиристорных пусковых устройств, называемых также мягкими пускателями (плавными пускателями). Термин «плавный пуск» употребляется в отношении целого ряда устройств, в основе которых лежат разные методы их построения. Устройства для плавного пуска могут регулировать следующие характеристики привода:

- вращающий момент;
- напряжения обмоток статора в разомкнутом электроприводе;
- напряжения обмоток статора в замкнутом электроприводе с обратной связью по скорости вращения;
- ток статора двигателя.

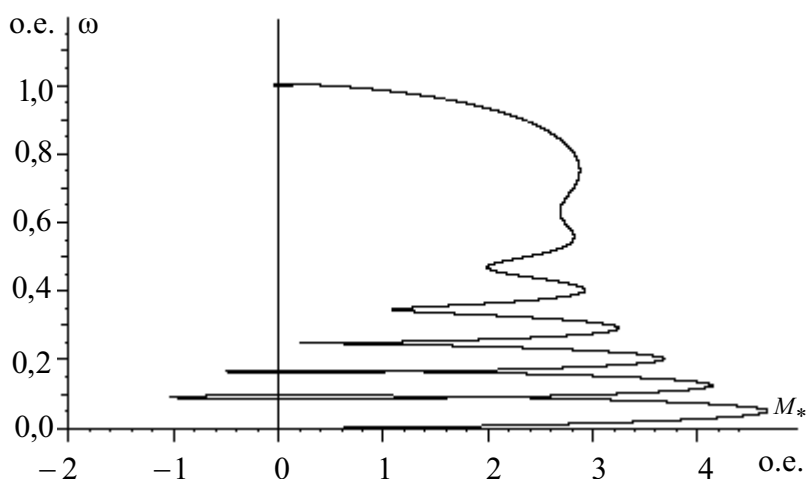


Рис. 6.3. Динамическая механическая характеристика короткозамкнутого асинхронного двигателя при большом суммарном моменте электропривода

Тиристорное пусковое устройство (ТПУ) представляет собой специализированный регулятор напряжения переменного тока с фазовым управлением (рис. 6.4), предназначенный для регулирования напряжения на статоре асинхронного двигателя при неизменной его частоте.

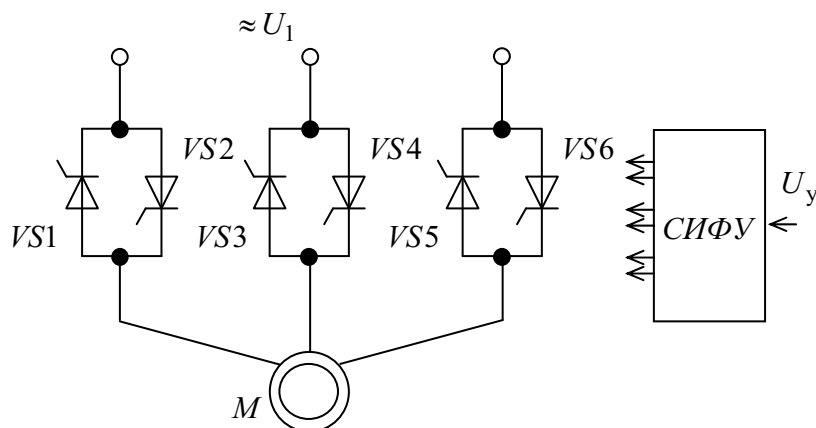


Рис. 6.4. Схема силовых цепей тиристорного пускового устройства

Отличаясь простой схемой, незначительными массой и габаритами, эти устройства позволяют:

- ограничить ток и момент на валу двигателя при пусках, реверсах и торможениях;
- уменьшить электрические, механические и тепловые нагрузки на элементы самого электропривода, кинематических схем технологического оборудования и систем электроснабжения и тем самым увеличить их срок службы;
- существенно снизить падения напряжения в питающей сети при пусках мощных двигателей.

Функциональная схема асинхронного электропривода с тиристорным пусковым устройством и задатчиком интенсивности на входе приведена на рис. 6.5.

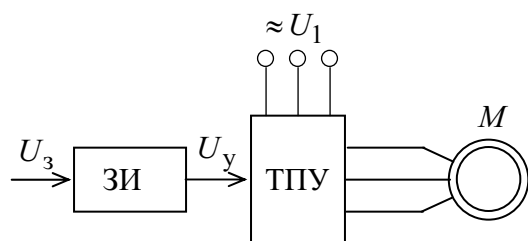


Рис. 6.5. Функциональная схема асинхронного электропривода с тиристорным пусковым устройством

Задатчик интенсивности (ЗИ), установленный на вход пускового устройства (ТПУ), формирует темп роста напряжения на обмотках статора асинхронного двигателя M . Как правило, выходное напряжение задатчика интенсивности – линейно-нарастающее, но может быть сформирован и более сложный закон изменения напряжения управления рис. 6.6, определяющий не только ускорение электропривода, но и его рывок.

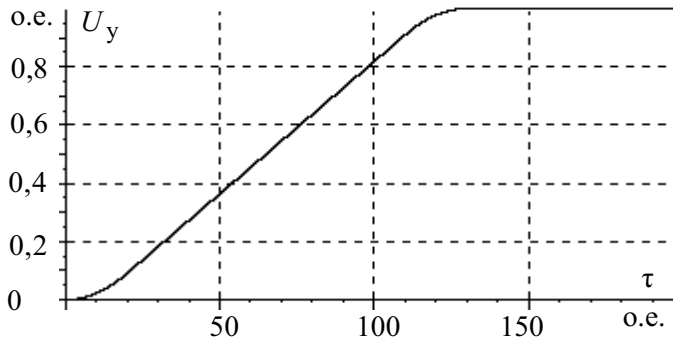


Рис. 6.6. Выходное напряжение задатчика интенсивности с S – образной характеристикой

Ускорение $d\omega/dt$ при пуске и торможении двигателя определяется темпом изменения сигнала U_y задатчика интенсивности, причем они связаны между собой зависимостью:

$$\frac{dU_y}{dt} \approx \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{\text{зад}}. \quad (6.6)$$

Значение ускорения $(d\omega/dt)_{\text{зад}}$ обычно выбирается таким образом, чтобы при известном характере нагрузки от скорости $M_c = f(\omega)$ и заданном моменте инерции J_Σ электропривода, момент двигателя $M_{\text{дв}}$, определяемый из уравнения:

$$M_{\text{дв}} = J_\Sigma \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{\text{зад}} + M_c \leq M_{\text{дв. доп}}, \quad (6.7)$$

не превысил допустимого значения $M_{\text{дв. доп}}$.

Исследования на имитационной модели показали, что пуск асинхронного электропривода через тиристорное пусковое устройство с задатчиком интенсивности позволяет практически исключить колебания электромагнитного момента на начальном участке механической характеристики (рис. 6.7).

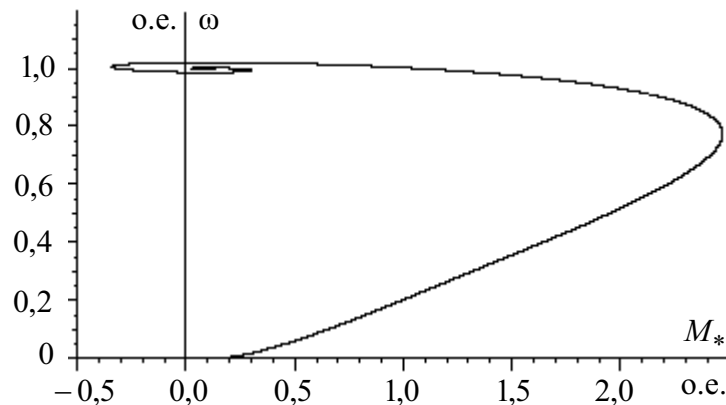


Рис. 6.7. Динамическая механическая характеристика пуска асинхронного двигателя через тиристорное пусковое устройство

Следовательно, с целью надежного функционирования асинхронных электроприводов, работающих с частыми пусками и торможениями, рекомендуется оснастить их тиристорными пусковыми устройствами, ограничивающими пусковой ток или формировать управляющее напряжение от датчика интенсивности.

6.3. Описание лабораторной установки

Внешний вид лабораторной установки представлен на рис. 6.8. Преобразовательная и коммутационная аппаратура расположена в шкафу 1, оборудованном принудительной вентиляцией. Рядом со шкафом расположена панель управления 2, на которой размещены органы управления лабораторным стендом. Асинхронный двигатель 3 находится на полу. Управление стендом, а также вывод всей текущей информации о параметрах измеряемых физических величин, можно производить с местной панели управления тиристорного пускового устройства или с персонального компьютера. Системный блок 4 и монитор 5 персонального компьютера являются составной частью стенда.

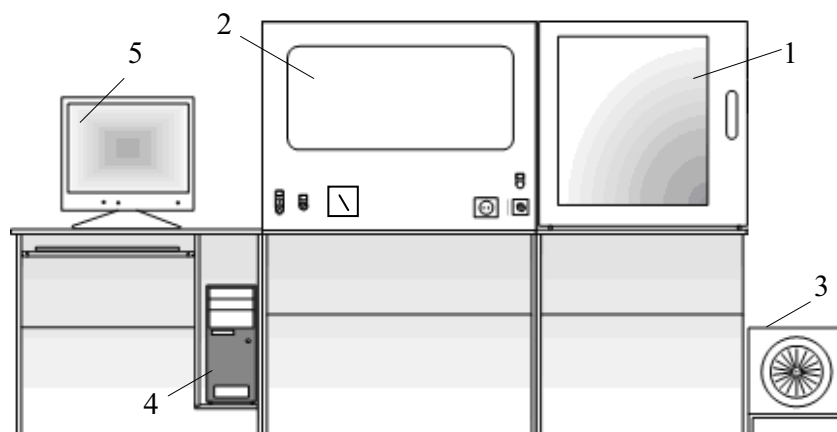


Рис. 6.8. Внешний вид лабораторной установки

Увеличенный внешний вид панели управления лабораторным стендом приведен на рис. 6.9.

На панель управления вынесен автоматический выключатель QF1, подключающий стенд, преобразователь частоты Danfoss VLT 2800 и пускатель Danfoss MCD 3000 к питающей сети. Пуск асинхронного двигателя непосредственным подключением к питающей сети (прямой пуск) от преобразователя частоты Danfoss VLT 2800 или от пускателя Danfoss MCD 3000 производится кнопкой «Пуск» SB1, останов – кнопкой «Стоп» SB2. Выбор пускового устройства осуществляется механическим переключателем выбора режима работы S2. На панель управления также вынесен переключатель S1 – переключатель блокировки преобразователя частоты Danfoss VLT 2800 и пускателя Danfoss MCD 3000.

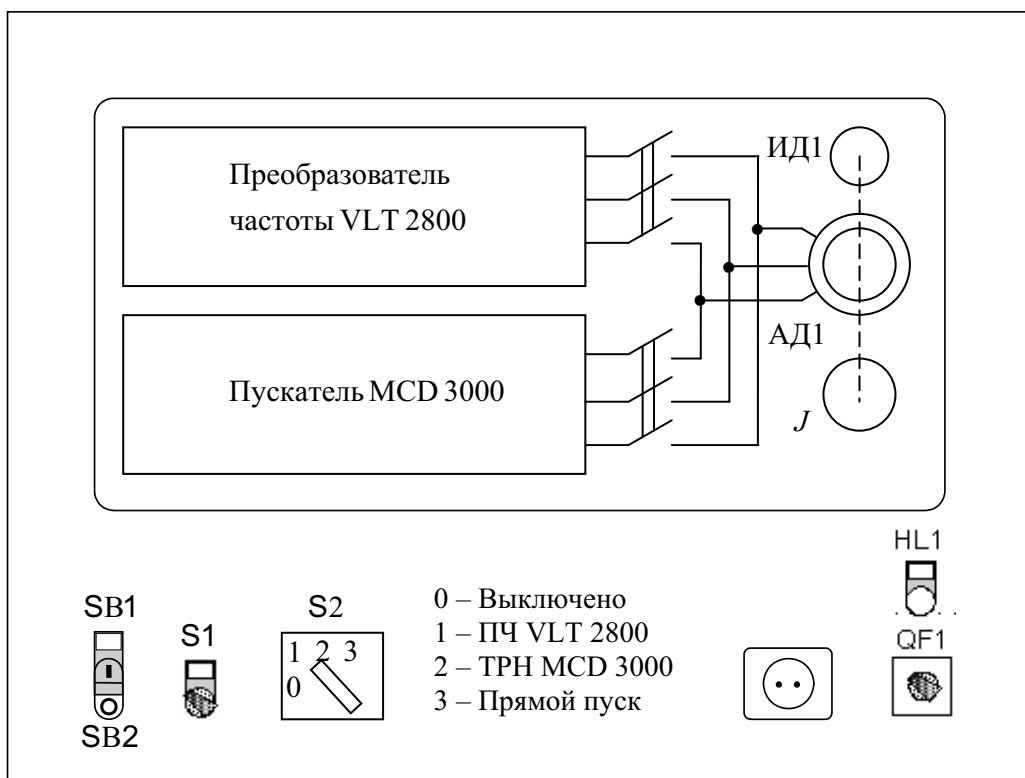


Рис. 6.9. Внешний вид панели управления лабораторным стендом

Условные буквенные обозначения элементов панели управления, их назначение и выполняемые функции сведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

№ п.п	Обозначение на панели управления, рис. 2.2	Выполняемые функции	Примечание
1.	SB 1	Команда «Пуск» электроприводов	Работает в импульсном режиме, для активации необходимо нажать и отпустить
2.	SB 2	Команда «Останов» электроприводов	Работает в импульсном режиме, для активации необходимо нажать и отпустить
3.	S1	Переключатель блокировки ЭП №1	Правое положение разрешает работу ЭП №1, центральное – запрещает. Может использоваться как средство экстренной остановки
4.	S2	Переключатель выбора режима работы	В соответствии с положением переключателя S3 изменяется схема пускового устройства
5.	QF1	Автоматический выключатель подключения питания к лабораторному стенду	Позволяет подключить или отключить лабораторный стенд от питающей сети
6.	HL1	Лампа-индикатор питания стенда	Сигнализирует о наличии питающего напряжения на стенде

Технические данные исследуемого асинхронного двигателя АД1.

Тип двигателя АД80В4У3:

$P_H = 1,5$ кВт; $U_{1ЛН} = 380$ В; $I_H = 3,5$ А; $n_H = 1400$ об/мин; $\eta_H = 78,5\%$;
 $\cos\varphi_H = 0,8$; $I_{II}/I_H = I_{II}^* = 7$; $M_{II}/M_H = M_{II}^* = 1,8$; $M_{max}/M_H = M_{max}^* = 2,2$;
 $M_{min}/M_H = M_{min}^* = 1,5$ $J_{ад} = 0,021$ кг·м².

6.4. Программирование параметров настройки устройства MCD3000

Настройку параметров тиристорного пускового устройства MCD3000 выполняют, используя *панель местного управления*. *Панель местного управления* расположена непосредственно на пускателе MCD3000. Внешний вид *панели местного управления* приведен на рис. 6.10. Настройки можно выполнить только при остановленном электроприводе. Когда MCD3000 находится в режиме программирования, светятся три светодиода справа от дисплея с семисегментными индикаторами.

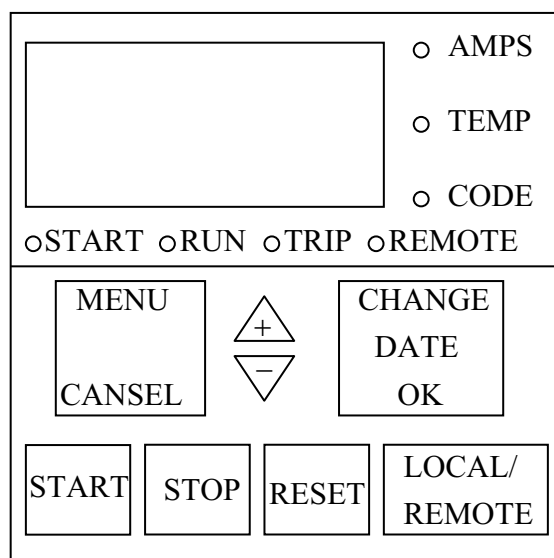
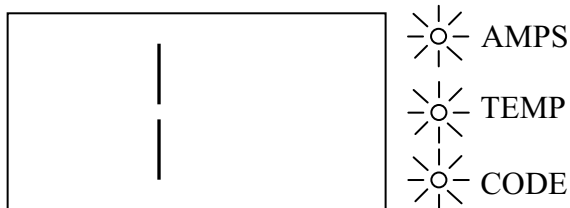


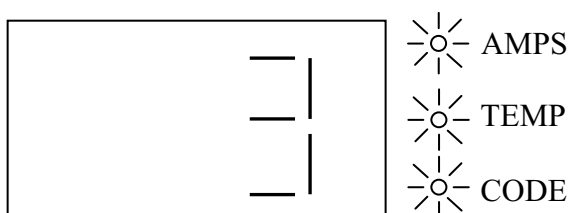
Рис. 6.10. Панель местного управления

Чтобы запрограммировать тиристорное пусковое устройство MCD3000 в соответствии с паспортными данными асинхронного двигателя, следует:

- нажать кнопку «MENU/CANSEL» на панели местного управления и войти в режим программирования. На дисплее появится номер первого программируемого параметра – Пар. 1 (номинальный ток двигателя). Номер параметра выровнен по левому краю и мерцает;
- выбрать параметр, который следует установить. Пользуясь кнопками «+/-», прокрутить перечень параметров до тех пор на экране дисплея пока не будет выведен требуемый;



- *просмотреть и если требуется изменить значение параметра.* Для чего нажатием кнопки «CHANGE DATA/OK» вывести на дисплей значение параметра (значения параметров выровнены по правому краю и мерцают)



- *увеличить или уменьшить значение параметра до требуемого значения при помощи кнопок «+/-»;*
- *для сохранения новой установки и возврата к номеру параметра нажать кнопку «CHANGE DATA/OK»;*
- *для возврата к номеру параметра без сохранения новой установки нажать кнопку «MENU/CANCEL»;*
- *для выхода из режима программирования повторно нажать кнопку «MENU/CANCEL».*

6.5. Программируемые параметры

1. Номинальный ток двигателя.

Значение ..., А. Зависит от модели двигателя.

Функция: Калибровка пускателя MCD3000 по номинальному току асинхронного двигателя.

Описание выбора: Установить в соответствии с номинальным током двигателя, который указан на табличке двигателя.

2. Ограничение тока двигателя.

Значение: 100–550 % от номинального тока двигателя. Заводская установка 350 %.

Функция: Устанавливает требуемое ограничение тока при пуске двигателя.

Описание выбора: Ограничение тока следует установить таким образом, чтобы уменьшить влияние пускового тока на питающую сеть и в то же время создать достаточный момент для пуска двигателя с подключенной нагрузкой на его валу. Формируемая электромеханическая характеристика двигателя приведена на рис. 6.11.

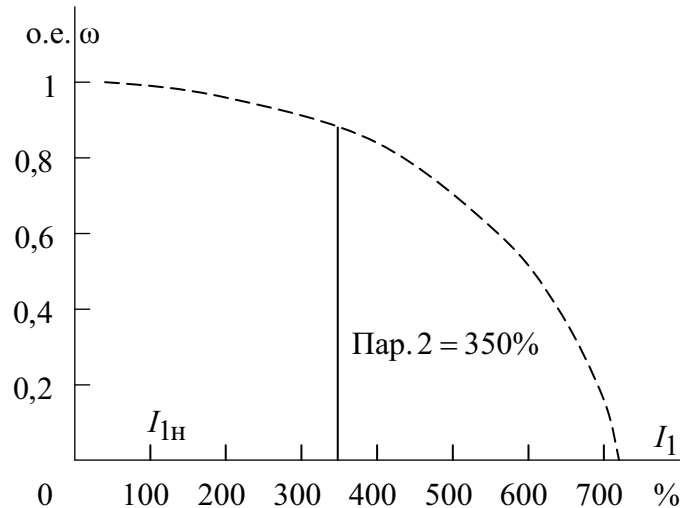


Рис. 6.11. Ограничение тока при пуске двигателя. Пар. 2

3. *Линейное нарастание тока – начальный ток.*

Значение: 100–550 % от номинального тока двигателя. Заводская установка 350 %.

Функция: Устанавливает значение тока для режима пуска с линейным нарастанием тока двигателя.

Описание выбора: См. описание параметра 4.

4. *Линейное нарастание тока – продолжительность линейного нарастания.*

Значение: 1–30 с. Заводская установка 1 секунда.

Функция: Устанавливает продолжительность линейного нарастания тока для режима пуска с линейным нарастанием тока двигателя.

Описание выбора: Режим пуска с линейным нарастанием тока модифицирует режим пуска с ограничением тока путем увеличения продолжительности нарастания тока. Режим пуска эквивалентен пуску двигателя от параболического задатчика интенсивности. Электропривод ограничивает рывок на заданном уровне. Формируемая электромеханическая характеристика двигателя при линейном нарастании тока приведена на рис. 6.12.

В общем случае режим пуска с линейным нарастанием тока можно использовать в следующих обстоятельствах.

- Если условия работы электропривода меняются от пуска к пуску, режим линейного нарастания тока обеспечит оптимальный плавный пуск, независимо от нагрузки двигателя, например, при включении нагруженного или ненагруженного конвейера.

В этом случае можно сделать такие настройки:

- Установить значение параметра 2 «Ограничение тока», таким образом, чтобы двигатель можно было разогнать до полной скорости при полной нагрузке.

- Установить значение параметра 3, «*Линейное нарастание тока – начальный ток*», таким образом, чтобы двигатель можно было разогнать без нагрузки.

- Установить значение параметра 4. «*Линейное нарастание тока – продолжительность линейного нарастания*» в соответствии с нужным режимом пуска. При этом необходимо обратить внимание на следующее: слишком малые значения продолжительности нарастания тока приводят к неоправданно высоким значениям пускового тока для пуска двигателя без нагрузки. Очень большие значения продолжительности нарастания тока могут вызвать запаздывания при пусках двигателя под нагрузкой.

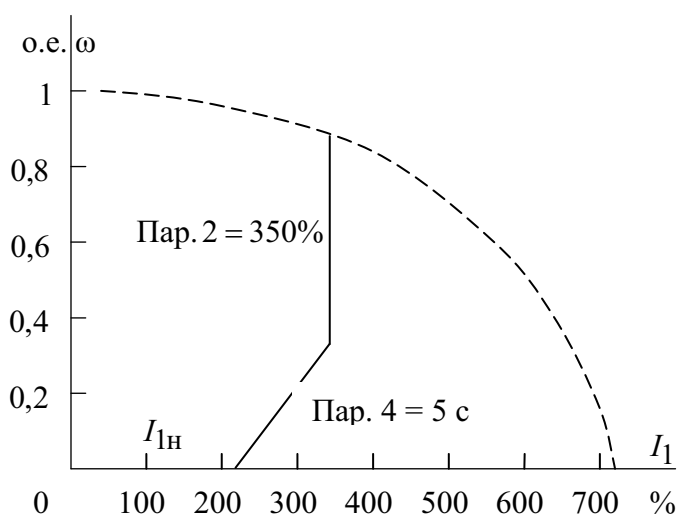


Рис. 6.12. Ограничение тока при пуске двигателя. Пар. 2 – Пар. 4

5. *Продолжительность линейного замедления для плавной остановки.*

Значение: 1–100 с. Заводская установка 0 с.

Функция: Устанавливает продолжительность линейного замедления для плавной остановки двигателя. Функция плавной остановки увеличивает продолжительность замедления вращения двигателя путем линейного снижения напряжения, подаваемого на двигатель после начала торможения.

Описание выбора: Установить продолжительность линейного замедления с целью оптимизации характеристик остановки двигателя под нагрузкой.

6. *Тепловая мощность двигателя.*

Значение: 5–120 с. Заводская установка 10 с.

Функция: Определяет продолжительность времени, в течение которого двигатель может выдерживать пусковой ток.

7. *Чувствительность к перекосу фаз.*

Значение: 1–10.

1–4 – повышенная чувствительность.

5 – нормальная чувствительность.

6–10 – пониженная чувствительность.

Функция: Задаёт чувствительность защиты от перекоса фаз.

Описание выбора: Отрегулировать размыкание цепи для адаптации к допустимому перекосу фаз. Для обычных условий подходит заводская установка, но может понадобиться настройка для адаптации к конкретным условиям на месте, например при чрезмерной нагрузке на одной из фаз.

Время срабатывания защиты от перекоса фаз также можно отрегулировать. См. описание пар. 12, «*Запаздывание защиты от минимального тока*». Во время пуска и остановки чувствительность к перекосу фаз, при которой происходит размыкание цепи, уменьшается в два раза.

8. *Минимальный ток, при котором происходит размыкание цепи.*

Значение: 15–120 % от номинального тока двигателя. Заводская установка 20 %.

Функция: Устанавливает минимально допустимый рабочий ток.

Описание выбора: В тех случаях, когда требуется остановить двигатель при обнаружении ненормально низкого значения тока статора, следует установить значение минимального тока, при котором происходит размыкание цепи, выше значения тока холостого хода двигателя и ниже нормального рабочего значения тока.

Для того, чтобы аннулировать действие функции защиты от минимального тока, следует установить значение тока, при котором происходит размыкание цепи, ниже значения тока холостого хода двигателя. Обычно меньше 25 %.

Время срабатывания защиты от минимального тока также можно отрегулировать. См. описание пар. 13, «*Запаздывание защиты от минимального тока*». Во время пуска и остановки двигателя функция защиты от минимального тока не действует.

9. *Мгновенная перегрузка, при которой происходит размыкание цепи.*

Значение: 80–550 % от номинального тока двигателя. Заводская установка 400 %.

Функция: Задаёт величину мгновенной перегрузки, при которой происходит размыкание цепи, следует установить для того, чтобы разомкнуть цепь двигателя в тот момент, когда он начинает терять скорость.

Время срабатывания защиты от мгновенной перегрузки также можно отрегулировать. См. описание пар. 14, «*Запаздывание защиты от мгновенной перегрузки*». Во время пуска и остановки двигателя функция защиты от мгновенной перегрузки не действует.

10. *Защита от избыточной продолжительности пуска.*

Значение: 0–255 с. Заводская установка 20 с.

Функция: Задаёт максимально допустимую продолжительность пуска.

Описание выбора: Установить продолжительность, которая немного больше нормальной продолжительности пуска двигателя. Если продолжительность пуска будет превышать нормальную, пускатель MCD3000 разомкнёт цепь. Таким образом, обеспечивается более раннее сообщение о том, что изменились условия в технологическом процессе. Эта функция также защищает устройство для плавного пуска двигателя от работы за пределами номинального пускового момента. Если значение равно 0 с, защита не действует.

11. Защита от опрокидывания фазы.

Значение: 0–2. Заводская установка 0–защита выключена.

0 – Выключена, разрешено вращение в прямом и обратном направлениях.

1 – Разрешено вращение только в прямом направлении (по часовой стрелке).

2 – Разрешено вращение только в обратном направлении (против часовой стрелки).

Функция: Устанавливает разрешённую последовательность чередования фаз входного напряжения.

Описание выбора: Сам по себе пускатель нечувствителен к смене чередования фаз. Эта функция позволяет ограничить вращение двигателя только в одном направлении. Защита устанавливается исходя из конкретных условий применения пускателя, например, для электропривода конвейера или вентилятора.

12. Запоздывание защиты от перекоса фаз.

Значение: 3–254 с. Заводская установка 3 с.

Функция: Задерживает размыкание цепи в случае обнаружения большего значения перекоса фаз чем то, которое допускается при установке чувствительности к перекосу фаз (см. пар. 7).

Описание выбора: Следует использовать этот параметр, чтобы избежать ненужного размыкания цепи из-за временного перекоса фаз.

13. Запоздывание защиты от минимального тока.

Значение: 0–60 с. Заводская установка 5 с.

Функция: Задерживает размыкание цепи, если величина тока двигателя меньше значения параметра «*Минимальный ток, при котором происходит размыкание цепи*» (пар. 8).

Описание выбора: Следует использовать этот параметр, чтобы избежать ненужного размыкания цепи из-за временного появления минимального тока.

Во время пуска и остановки двигателя функция защиты от минимального тока не действует.

14. Запаздывание защиты от мгновенной перегрузки.

Значение: 0–60 с. Заводская установка 0 с.

Функция: Задерживает размыкание цепи, если величина тока двигателя больше значения параметра «*Мгновенная перегрузка, при которой происходит размыкание цепи*» (пар. 9).

Описание выбора: Следует использовать этот параметр, чтобы избежать ненужного размыкания цепи из-за временной перегрузки.

15. Запаздывание повторного пуска

Значение: 0–254 единицы. Заводская установка 1 единица. Одна единица установки соответствует 10 с.

Функция: Устанавливает минимальный промежуток времени между завершением остановки и началом следующего пуска.

Описание выбора: Установить в соответствии с требованиями технологического процесса. Значение 0 задает минимальное запаздывание перезапуска в 1 секунду. В течение периода запаздывания повторного пуска светится светодиод «CODE», который находится справа от цифрового дисплея MCD3000, указывая на то, что пуск двигателя не может быть выполнен.

Выше приведены только основные параметры программирования пускателя MCD3000. Всего пускатель MCD3000 допускает производить установку 53 параметров.

6.6. Порядок включения стенда и пускателя MCD3000

Перед непосредственным включением стенда все автоматы и переключатели должны находиться в следующих положениях:

- автоматы QF1 – в вертикальном положении;
- переключатель S1 – в вертикальном положении, блокировка электроприводов включена;
- переключатель S2 в положении «Выключено».

Для включения лабораторного стенда и предварительной подготовки электроприводов необходимо включить общий автомат QF1 питания стенда поворотом ручки по часовой стрелке. Должна загореться сигнальная лампочка HL1, включиться подсветка шкафа 1, а в ручке переключателя S1 светится сигнальная лампочка (см. рис. 6.9).

Переключатель S2 выбора режимов работы установить в положение, соответствующее типу исследуемого электропривода, в данном случае асинхронного электропривода с пускателем MCD3000.

Снимаем блокировку электроприводов поворотом переключателя S1 по часовой стрелке (сигнальная лампочка в ручке переключателя гаснет).

Устанавливаем или проверяем правильность установки всех необходимых параметров настройки пускателя MCD3000.

После чего электропривод можно запустить нажатием кнопки SB1.

6.7. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторным стендом.
2. Изучить методические указания по программированию и порядку включения и эксплуатации пускателя MCD3000.
3. Подключить к токовым клеммам лабораторного стенда светолучевой осциллограф.
4. Установить ручку переключателя S2 в положение 3 – «Прямой пуск».
5. Снять блокировку электроприводов поворотом переключателя S1 по часовой стрелке (сигнальная лампочка в ручке переключателя гаснет).
6. Запустить асинхронный электропривод прямым включением, нажав кнопку «Пуск» SB1.
7. Снять на кальку кривую переходного процесса тока статора. Определить время переходного процесса и максимальный пусковой ток.
8. Выключить электропривод, нажав кнопку SB2 – «Стоп».
9. Установить ручку переключателя S2 в положение 2 – «ТРН MCD3000».
10. Произвести настройку (проверку настройки) параметров тиристорного пускового устройства MCD3000, используя *панель местного управления*.
11. Запустить асинхронный электропривод с тиристорным пусковым устройством MCD3000, нажав кнопку «Пуск» SB1.
12. Снять на кальку кривую переходного процесса тока статора. Определить время переходного процесса и пусковой ток. Установить соответствие между установленным максимальным значением пускового тока и его фактическим значением по кривой переходного процесса.
13. Выключить асинхронный электропривод с тиристорным пусковым устройством MCD3000, нажав кнопку SB2 – «Стоп».
14. Изменить значения параметров по пунктам №№ 2–14 (по указанию преподавателя).
15. Провести повторный пуск и останов асинхронного двигателя, контролируя переходные процессы тока статора осциллографом и показаниями *панели местного управления*.
16. Провести расчет переходных процессов тока статора $I_1(t)$ момента $M(t)$ и скорости $\omega(t)$ при прямом пуске асинхронного двигателя, а также при заданных методах пуска двигателя с ограничениями тока. Параметры схемы замещения асинхронного двигателя АД2 определить по методике [1].
17. Произвести анализ полученных результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов динамических характеристик асинхронного двигателя.

6.8. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема силовых цепей для выбранного способа пуска асинхронного двигателя.
3. Осциллограммы пусков и торможений двигателя.
4. Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя.
5. Расчетные графики переходных процессов тока статора $I_1(t)$ момента $M(t)$ и скорости $\omega(t)$.
6. Анализ совпадения экспериментальных и теоретических графиков переходных процессов тока статора $I_1(t)$ момента $M(t)$ и скорости $\omega(t)$ при пусках асинхронного двигателя.
7. Краткие выводы по лабораторной работе.

6.9. Контрольные вопросы

1. Почему при пуске асинхронного двигателя необходимо ограничивать пусковой ток?
2. Какие существуют способы уменьшения пусковых токов?
3. Допускают ли асинхронные двигатели перегрузку и какую?
4. Какими способами можно определить вращающий момент асинхронного двигателя?
5. По каким формулам можно рассчитать и построить механическую характеристику асинхронного двигателя?

6.10. Список литературы

1. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Механические и электромеханические характеристики автоматизированных электроприводов: учебное пособие. – Ч1. – Томск.: Изд-во ТПУ, 2004. – 123 с.
2. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
3. Шубенко В.А., Браславский И.Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. – М.: Энергия, 1972. – 200 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ ПО ОТКЛОНЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ

7.1. Цель работы

Изучить методику оценки показателей качества напряжения (ПКЭ), проведения экспериментальных исследований и обработки результатов экспериментов в соответствии с требованиями ГОСТ 13109–97.

7.2. Теоретические сведения

Качество электрической энергии вместе с надежностью электроснабжения и его экономичностью является важнейшим требованием, предъявляемым к производству и передаче электроэнергии потребителям. ПКЭ регламентированы специальным техническим законом ГОСТ 13109–97.

Одним из основных показателей качества электрической энергии являются отклонения напряжения на зажимах электроприемников от номинального значения. Влияние уровня подведенного напряжения на производительность механизмов, освещенность помещений, надежность и долговечность эксплуатации электрооборудования общеизвестно.

В связи со случайным характером нагрузок отдельных участков электрической сети и большим количеством нагрузок полноценный анализ качества напряжения возможен только вероятностно-статистическими методами. Вероятностными методами можно решать такие задачи, как выбор мест установки регулирующих устройств, выбор диапазонов и ступеней регулирования напряжения, выбор мощности, место установки и режимов работы компенсирующих устройств.

Статистический метод дает возможность охарактеризовать суммарное воздействие всех влияющих факторов на исследуемую величину отклонения напряжения с помощью интегральных критериев, учитывающих величину отклонения, продолжительность отклонения и вероятность появления того или иного отклонения с определенной продолжительностью.

Случайной называют функцию $y = f(x)$, которая в результате опыта принимает некоторое заранее неизвестное значение. Каждое такое значение называют *реализацией случайной функции*, а все полученные

реализации данной случайной функции составляют *ансамбль реализаций*. Случайные функции, непосредственно зависящие от времени, называют случайными процессами.

Процесс называется стационарным, если его вероятностные характеристики инвариантны во времени, т. е. например его математическое ожидание имеет приблизительно постоянную величину, которая сохраняется независимо от начала отсчета времени.

Важнейшим свойством случайных процессов является свойство эргодичности. Эргодичность позволяет перейти от усреднения по ансамблю реализаций к усреднению по времени для одной реализации. Например, математическое ожидание эргодического процесса можно найти не только как предел бесконечной последовательности среднеарифметических значений множества реализаций, но и как среднеарифметическое значение ординат развернутой реализации при стремлении времени усреднения к бесконечности. Это свойство имеет очень большое практическое значение, так как позволяет распространить характеристики, полученные для одной системы на все остальные системы, где наблюдается данный случайный процесс. Это значительно упрощает исследование, т. к. оно связано с накоплением статистических данных, получаемых, например, с помощью самопишущего прибора в серии экспериментов.

Статистический анализ заключается в определении основных вероятностных характеристик процесса. Он может быть произведен как на основе обработки имеющейся реализации, так и непосредственно подключением на вход прибора напряжения, отражающего исследуемый случайный стационарный процесс. В последнем случае чаще всего анализаторы используются для определения плотности распределения вероятностей $f(v)$ случайной величины v – отклонения напряжения от номинального.

Плотность распределения является кривой, позволяющей судить о количестве случаев отклонений напряжения в диапазоне $(v_2 - v_1)$ или о вероятности (времени) отклонения напряжения в пределах этого диапазона (рис. 7.1, *а*). Получение и обработка непрерывной кривой распределения затруднительны. Поэтому данные целесообразно группировать и представлять в виде гистограммы (рис. 7.1, *б*), заменяющей кривую. Диапазон изменения величины в этом случае разбит на ряд интервалов (разрядов) одинаковой ширины Δv , которым соответствуют различные вероятности величин в этих интервалах.

Для решения практических задач применяют числовые методы, используя числовые характеристики случайных величин. Они представляются так называемыми моментами: начальными и центральными. Начальные моменты могут быть представлены выражением

$$\alpha_s = \sum_1^K V_i^s * P_i, \quad (7.1)$$

где V_i – отклонение напряжения в i -й момент измерения; P_i – вероятность появления этого отклонения; K – число разрядов; S – показатель степени, характеризующий порядок момента.

Наиболее важным из начальных моментов является первый начальный момент или математическое ожидание. При достаточно большом числе измерений вычисленное среднее арифметическое отклонение напряжения приближается к величине математического ожидания $M(v)$ и его значение может быть определено из выражения

$$\alpha_1 = \sum_1^K V_i P_i = M(v). \quad (7.2)$$

Второй начальный момент отклонения напряжения называют «не-

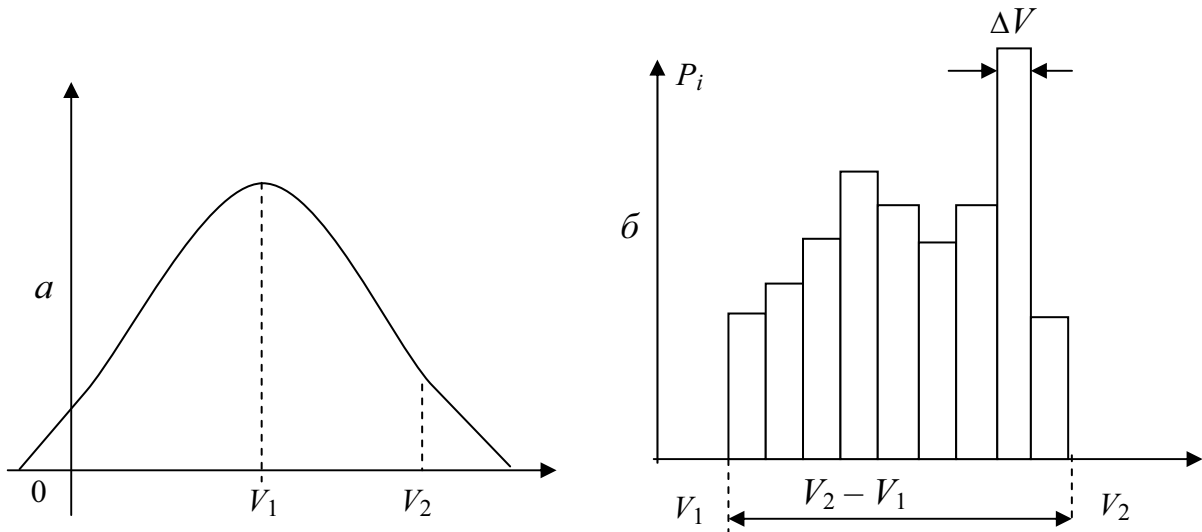


Рис. 7.1. Кривая плотности распределения (а) и гистограмма отклонения напряжения (б)

одинаковостью» и обозначают

$$\alpha_2 = N = \sum_1^K V_i^2 P_i. \quad (7.3)$$

Центральные моменты могут быть представлены выражением

$$\mu_s = \sum_1^K [V_i - M(v)]^s P_i. \quad (7.4)$$

Во многих случаях качество напряжения достаточно полно характеризуется моментами первого и второго порядка. Центральный момент первого порядка используется редко. Чаще всего применяется второй

центральный момент, характеризующий рассеяние случайной величины от ее математического ожидания и который называют дисперсией:

$$D = \sum_1^k [V_i - M(v)]^2 P_i. \quad (7.5)$$

Часто рассеяние характеризуется стандартным отклонением или стандартом. Стандартом называется среднеквадратическое отклонение случайного процесса от среднего значения (среднеквадратическое отклонение функции $V(t)$ от среднего уровня). Стандарт связан с дисперсией и «неодинаковостью» напряжения соотношениями:

$$\sigma = \sqrt{D}; \quad (7.6)$$

$$N = M_{(v)}^2 + \sigma^2. \quad (7.7)$$

Все основные вероятностные характеристики случайного стационарного процесса могут быть вычислены по имеющейся гистограмме распределения отклонений напряжений.

7.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из испытательного стенда и подключаемого к нему статистического анализатора САКН-1.

Испытательный стенд представляет собой генератор случайных напряжений и имитирует узел нагрузки цеховой сети – распределительный пункт РП, от которого питается ряд электроприемников, хаотично включающихся и отключающихся. На мнемосхеме стенда это лампочки, случайным образом включающиеся и отключающиеся. САКН-1 подключен к сборным шинам РП. Так как потери напряжения в кабельной линии к ЛЭП зависят от числа и мощности работающих в данный момент электроприемников, то напряжение на шинах РП постоянно изменяется, что и фиксируется прибором.

Вольтметр стенда подключен к сборным шинам РП. Поэтому он также отражает все флуктуации напряжения на его шинах.

Питание на стенд подается включением сетевого автомата QF . Регулятором «Регулирование напряжения» устанавливается уровень среднего напряжения на шинах РП. Тумблер режима контроля напряжения позволяет использовать вольтметр стенда для установки регулятором необходимого среднего напряжения (положение «регулирование») или текущий контроль напряжения на шинах РП (положение «работа»).

Статический анализатор качества напряжения САКН-1 предназначен для получения гистограммы отклонений напряжения в электрических сетях промышленных, сельских и коммунально-бытовых потреби-

телей. Прибор САКН-1 является переносным полупроводниковым устройством с дискретной цифровой индикацией.

Весь диапазон отклонений напряжения в сети делится прибором на 8 интервалов. Каждому интервалу соответствует свой счетчик. Подключенный к интересующему нас узлу нагрузки прибор производит периодические мгновенные замеры отклонений напряжения. В результате счетчиками накапливается информация: сколько раз отклонение напряжения попадало в каждый из восьми интервалов, т. е. какова частота (вероятность) попадания отклонения напряжения в каждый интервал (рис.7.2).



Рис. 7.2. Диапазон отклонений напряжения

Блок-схема анализатора приведена на рис. 7.3. Различным уровням измеряемого напряжения соответствуют разные уставки измерительных органов. С их помощью осуществляется квантирование измеряемого напряжения. Сигнал измерительного органа поступает на схему совпадения И. Далее сигнал поступает на импульсный счетчик Сч. Одновременно сигнал измерительного органа поступает на элемент НЕ, с которого затем подается на схему совпадения нижележащего канала по уставке измерительного органа. Помимо этого, на схемы совпадения всех измерительных каналов поступает еще сигнал от элемента времени ЭВ, выполненного по схеме релаксационного генератора. Он выдает сигнал в виде кратковременного импульса через определенные промежутки времени. Если напряжение выше уставки верхнего канала, то в сработавшем состоянии находятся все измерительные органы. Сигналы от измерительных органов поступают на элемент НЕ, на выводах которых

сигналы отсутствуют. Следовательно, один из входных сигналов схемы совпадения И отсутствует, и ни один из импульсных счетчиков сработать не может. Исключение составляет лишь верхний канал, который не имеет запрещающего сигнала. Импульсный счетчик этого канала срабатывает в момент поступления импульса от релаксационного генератора. При снижении напряжения ниже уставки верхнего канала на выходе его измерительного органа сигнал отсутствует. Тем самым появляется сигнал на выходе элемента НЕ верхнего канала и разрешается работа следующего по уставке канала. Этот канал срабатывает при появлении очередного импульса релаксационного генератора. Цифровые показания импульсных счетчиков тем самым воспроизводят гистограмму распределения отклонений напряжения.

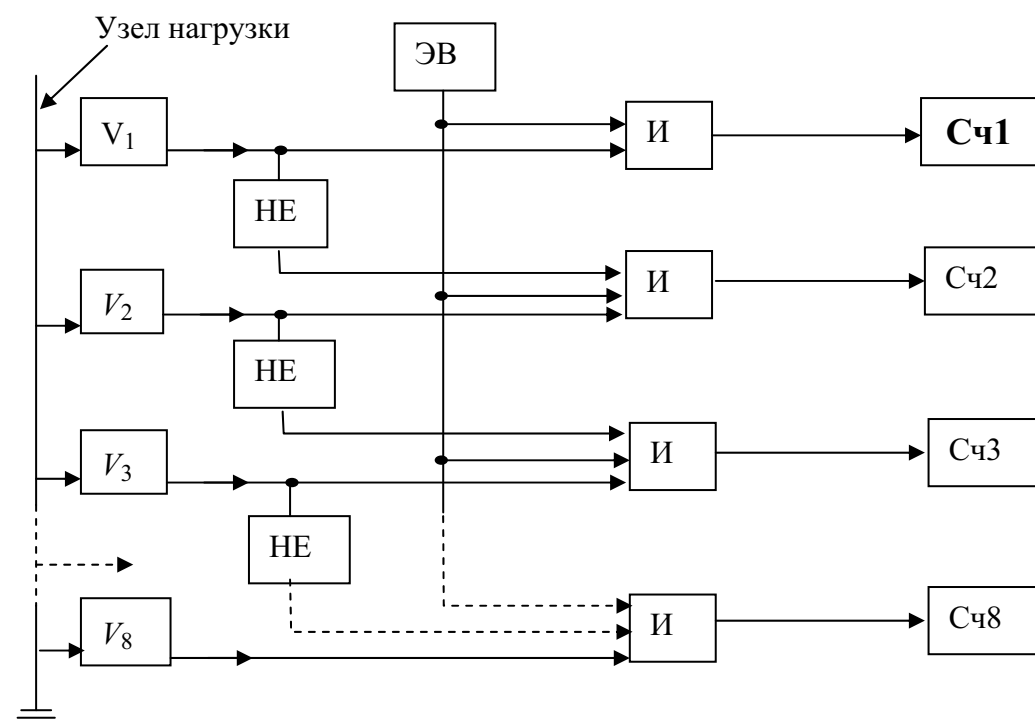


Рис. 7.3. Блок-схема анализатора САКН-1

7.3.1. Технические данные САКН-1

Прибор обеспечивает возможность контроля среднего значения переменного напряжения частоты 50 гц с номинальными действующими значениями 100, 127, 220 и 380 В.

Весь контролируемый диапазон отклонений напряжения разбит на восемь интервалов. Каждому интервалу соответствует свой цифровой индикатор-счетчик. Значения границ интервалов выбираются штекерами на матрице «границы интервалов» из следующего ряда: 85,00; 88,75; 90,00; 92,50; 95,00; 96,25; 97,50; 98,75; 100,00; 101,25; 102,50; 103,75; 105,00;

107,50; 110,00; 111,25; 115,00 %, причем граница 100,00 %, определяющая значение напряжения, называемого в дальнейшем опорным, всегда соответствует границе между четвертым и пятым интервалами. Ширина интервала всегда должна выбираться одинаковой по всему диапазону.

Прибор обеспечивает возможность сдвига переключателем «Сдвиг %» контролируемого диапазона напряжения ступенями через 2,5 % на величину ± 10 % от выбранного номинального напряжения.

Фиксация интервала, в котором находилось в момент контроля исследуемое напряжение, осуществляется цифровым индикатором автоматически через заданные промежутки времени. Сброс на ноль показаний индикаторов не предусматривается.

Полная погрешность измерений напряжения не превышает ± 5 %.

Максимальная мощность, потребляемая прибором, не превышает 35 ВА.

7.4. Программа выполнения работы

1. Снять гистограмму отклонений напряжения на шинах узла нагрузки.
2. По полученной гистограмме распределения отклонений напряжения вычислить основные статистические параметры, характеризующие качество напряжения: $M(v)$, D , N .

7.4.1. Последовательность выполнения работы

1. Подготовка анализатора к работе:
 - а) установите переключатель «напряжение» в положение 220 В;
 - б) установите тумблер «Работа-регулирование» в положение «Работа»;
 - в) установите переключатель «Сдвиг %» в положение «100» или другое положение (задается преподавателем);
 - г) установите штекерами на матрице «границы интервалов» необходимые значения границ интервалов.

Внимание! Штекер 100 %, соответствующий границе между четвертым и пятым интервалами, должен быть всегда включенным.

Значения напряжений границ интервалов для контролируемого напряжения 220 В и при различных положениях переключателя «Сдвиг %» приведены в приложении (табл. П.1).

Для данного стенда контролируемое напряжение 220 В, а ширину интервала желательно взять 2,5 %;

д) установите требуемый период замеров контролируемого напряжения, для чего:

- установите тумблер «меньше-больше» в одно из положений (при времени от 10 до 100 с тумблер устанавливается в положение «меньше», от 30 до 150 с – в положение «больше»);

- ослабьте фиксатор ручки потенциометра «время», вращая ручку потенциометра «время», установите требуемый промежуток времени между замерами (для стенда период замеров желательнее брать минимальный);
- закрепите ручку потенциометра «время» фиксатором и не крутите ее во время производства измерений во избежание искажений информации»

е) запишите показания счетчиков.

2. Включение испытательного стенда:

В присутствии преподавателя включите стенд автоматом *QF*.

3. Включите анализатор САКН-1 тумблером «сеть-выкл.» И по работе счетчиков убедитесь в работе прибора. Работа одного или всех реле схемы коммутации при неработающих счетчиках возможна при неправильно выбранном диапазоне контроля. В этом случае необходимо переключателем «Сдвиг %» сдвинуть контролируемый диапазон прибора в сторону «+», если работает одно реле схемы коммутации, либо в сторону «-», если работают все реле схемы коммутации.

4. По истечении 45 мин отключите питание стенда автоматом *QF* «сеть».

5. Запишите показания счетчиков.

7.4.2. Обработка результатов измерения

Пусть с помощью прибора получены следующие данные.

Таблица 7.1

Результаты измерений

Дата и время измерения	Показания счетчиков							
	1	2	3	4	5	6	7	8
15.X. 10.00	8340	2380	4060	3090	7480	1000	0570	9750
22.X. 10.00	8340	2480	8060	5590	0480	1400	0570	9750
Значения границ интервалов, %	-12,5	-10,0	-7,5	-5,0	-2,5	0	+2,5	+5,0
	-10,0	-7,5	-5,0	-2,5	+0	+2,5	+5,0	+7,5

Определим вероятность попадания в каждый i -й интервал, для чего вычитаем из замеров 22.X соответствующие замеры 15.X и каждую из полученных разностей делим на сумму разностей, т. е.:

$$P_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^k n_i}. \quad (7.8)$$

Таблица 7.2

Результаты расчетов

Значения границ интервалов, %	-12,5	-10,0	-7,5	-5,0	-2,5	0	+2,5	+5
Вероятность, P _i	-10,0	-7,5	-5,0	-2,5	0	+2,5	+5	+7,5
	0,00	0,01	0,40	0,25	0,30	0,04	0,00	0,00

Гистограмму можно построить графически, откладывая на горизонтальной оси отклонения напряжения от номинального, а на вертикальной – вероятности.

Во многих случаях необходимо знать числовые характеристики процесса. Они могут быть определены следующим образом. Интервалы полученной гистограммы нумеруются таким образом, чтобы ближайший к середине имел нулевой номер, слева от него номера убывают на единицу, справа возрастают, как показано в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Пример нумерации интервалов

Номер счетчика	1	2	3	4	5	6	7	8
Номер интервала, W _i	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
Вероятность, P _i	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈

Рассчитываются некоторые промежуточные величины:

$$A = \sum_{i=1}^{i=8} P_i \cdot W_i;$$

$$D_A = \sum_{i=1}^{i=8} P_i \cdot W_i^2 - A^2.$$

Определяются числовые характеристики гистограммы:

$$M(v) = V_0 + \Delta V \cdot A;$$

$$D = \Delta V \cdot D_A - \frac{1}{12};$$

$$\sigma = \sqrt{D};$$

$$N = D + M_{(v)}^2,$$

где $M(v)$ – математическое ожидание отклонений напряжения от номинального, %; D – дисперсия отклонений напряжения, $(\%)^2$; σ – стандартное отклонение (рассеивание), %; N – неодинаковость напряжения, (%);

V_0 – значение середины нулевого интервала, %; ΔV – ширина интервала, %; W_i – номер интервала.

По имеющейся гистограмме отклонений напряжения можно определить ряд вероятностных параметров, таких как интегральная вероятность выхода напряжения за допустимые пределы отклонений, среднее значение напряжения (математическое ожидание), рассеяние отклонений напряжения вокруг среднего значения (стандартное отклонение) и др. Так, например, вероятность выхода напряжения за допустимые пределы может быть определена по формуле (7.8) простым суммированием всех вероятностей попадания напряжения в интервалы, лежащие за допустимыми пределами отклонений, либо из выражения

$$P_{\text{вых}} = \frac{n_{\text{вых}}}{\sum n}, \quad (7.9)$$

где $n_{\text{вых}}$ – суммарное количество измерений напряжения, вышедших за допустимые пределы, а $\sum n$ – суммарное количество всех измерений напряжения прибором. При определении $P_{\text{вых}}$ выходные пределы отклонений задаются преподавателем.

7.4.3. Пример расчета

Таблица 7.4

Данные к примеру

Дата и время измерения	Показания счетчиков							
	1	2	3	4	5	6	7	8
20.X1 12..00	0328	4321	7283	3925	5895	3917	6181	9204
21.X1 12.00	0357	4531	8001	5073	6469	4060	6229	9204
Значения границ интервалов, %	-10,0	-7,5	-5,0	-2,5	0	+2,5	+5,0	+7,5
	-7,5	-5,0	-2,5	0	+2,5	+5,0	+7,5	+10,0
Значения середин интервалов, %	-8,75	-6,25	-3,75	-1,25	+1,25	+3,75	+6,25	+8,75
Номер интервала	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
Разность показаний счетчиков	29	210	718	1148	574	143	48	0
Вероятность попадания в интервал	0,010	0,073	0,250	0,400	0,200	0,050	0,017	0,000

По данным табл. 7.4 строим гистограмму (рис. 7.4).

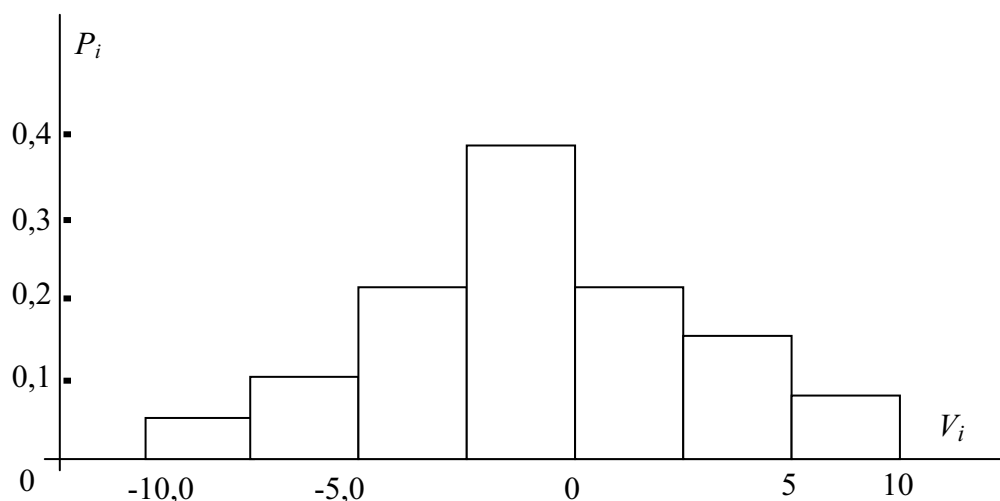


Рис. 7.4. Гистограмма отклонений напряжения

Рассчитываем промежуточные величины и числовые характеристики гистограммы:

$$A = -0,010 \cdot 3 - 0,073 \cdot 2 - 0,25 \cdot 1 + 0,200 \cdot 1 + 0,050 \cdot 2 + 0,017 \cdot 3 = -0,075;$$

$$D_A = 0,010 \cdot 9 + 0,073 \cdot 4 + 0,250 \cdot 1 + 0,200 \cdot 1 + 0,050 \cdot 4 + 0,017 \cdot 9 - 0,075^2 \cong 1,179;$$

$$M(v) = -1,25 + 2,5 \cdot (-0,075) \cong -1,438 \%;$$

$$D = (2,5)^2 \cdot 1,179 - \frac{1}{12} \cong 7,285 (\%)^2.$$

7.4.4. Использование результатов измерений

Согласно действующему ГОСТ 13109–97 на качество электрической энергии напряжение на зажимах электроприемников должно находиться в регламентированном диапазоне с интегральной вероятностью 0,95.

Определим для приведенного выше примера интегральную вероятность попадания отклонений напряжения в диапазон $\pm 5\%$.

По формуле (7.9) имеем

$$P_{\text{вых}} = \frac{n_{\text{вых}}}{\sum n} = \frac{29 + 210 + 48}{29 + 210 + 718 + 1148 + 574 + 143 + 48} = \frac{287}{2870} = 0,1.$$

Это вероятность того, что отклонения напряжения не укладываются в заданный диапазон. Следовательно, искомая вероятность составит

$$P = 1 - P_{\text{вых}} = 1 - 0,1 = 0,9.$$

В то же время ГОСТ требует иметь эту вероятность не менее 0,95. Значит, качество напряжения в данном случае не удовлетворяет требованиям ГОСТа.

Выясним, каким образом числовые характеристики гистограммы отражают качество напряжения. Для этого рассмотрим два случайных процесса.

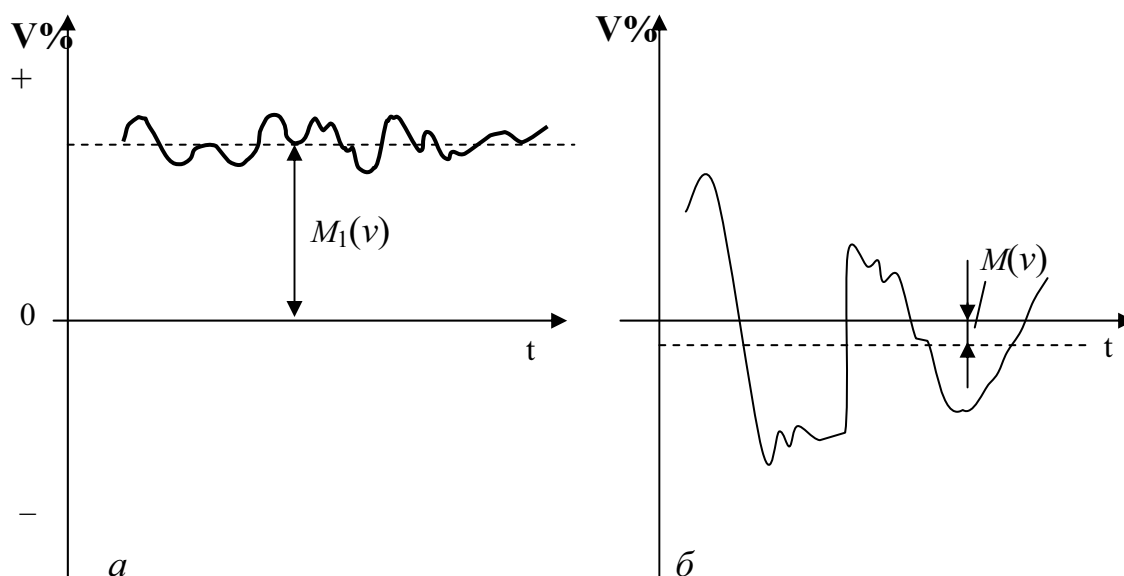


Рис. 7.5. Случайные процессы

На рис. 7.5, *a* реализация случайного процесса $V = f(t)$ смещена на некоторую постоянную величину в положительную область относительно $V = 0\%$, т. е. относительно номинального напряжения. Это смещение и характеризует числовая характеристика $M_1(v)$ – математическое ожидание отклонения напряжения. Разброс же отдельных значений отклонений напряжения вокруг $M_1(v)$ невелик. Величину этого разброса характеризует другая числовая характеристика D – дисперсия (или ее производная $\sigma = \sqrt{D}$ – среднее квадратичное отклонение). Если переключением отпаек трансформатора добиться уменьшения математического ожидания, то тем самым качество напряжения возрастет, а случайный процесс будет иметь вид (рис. 7.6).

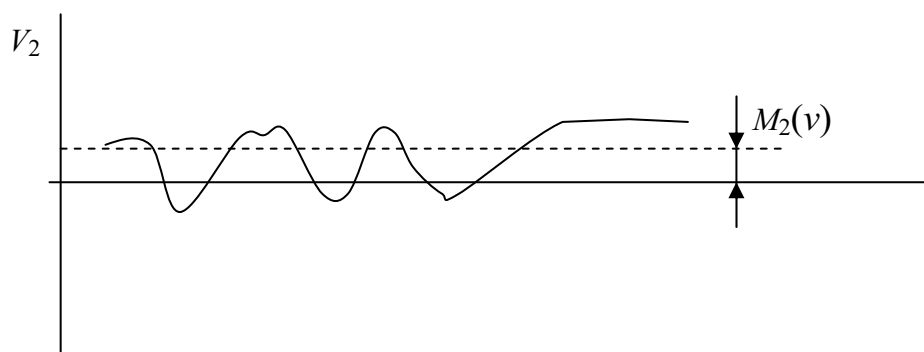


Рис. 7.6. Случайный процесс

На рис. 7.5, б математическое ожидание $M(v)$ достаточно мало, а некачественность напряжения возникает из-за большой дисперсии (рассеяния) случайной величины V – отклонения напряжения от своего среднего значения, т.е. математического ожидания $M(v)$. Следовательно, переключение трансформатора будет лишь увеличивать величину $M(v)$ и тем самым еще более ухудшать качество напряжения, т.к. дисперсия при этом не изменяется.

Для уменьшения дисперсии на практике применяют средства плавного автоматического регулирования напряжения в центре питания или у потребителя, например, регулируемые конденсаторными установками, применением линейных регуляторов.

Можно также увеличить сечение питающих проводов или применить продольную компенсацию.

Для приведенного выше примера $M(v) = -1,438 \%$; $\sigma = 2,7 \%$, $N = 9,34(\%)^2$.

Применив отпайку на ТП, увеличивающую напряжения на 2,5 %, мы, тем самым, несколько уменьшим неодинаковость N' и значит улучшим качество напряжения:

$$N' = 7,285 + (-1,438 + 2,5)^2 \cong 8,4 \%$$

$$N' < N = 9,34 \%$$

7.5. Содержание отчета

1. Блок-схема анализатора САКН-1 и краткие пояснения к ней.
2. Основные технические данные анализатора.
3. Результаты измерений и расчетов в виде табл. 7.4.
4. Построенная гистограмма отклонений напряжения.
5. Расчет основных вероятностных числовых характеристик гистограммы.
6. Выводы о качестве напряжения на шинах РП и рекомендации по его улучшению.

7.6. Контрольные вопросы

1. Можно ли САКН-1 использовать как обычный вольтметр?
2. Как влияет выбор границ интервалов на получаемую гистограмму?
3. Зачем в анализаторе предусмотрен переключатель «Сдвиг»?
4. Какой, по Вашему, критерий наиболее полно характеризует качество напряжения?
5. В чем заключается недостаток существующей гостовской оценки качества напряжения?

7.7. Список литературы

1. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск.: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – 60 с.
2. Валов Б.М., Литвак В.В., Маркман Г.З., Харлов Н.Н. Контроль качества электрической энергии. – Томск.: Изд. ТПИ, 1982. – 88 с.
3. Методика контроля и анализа качества электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – М.: Главное управление по государственному энергетическому надзору Российской Федерации, 1995. – 78 с.

Таблица П.1

Переключатель «Напряжение в положении 220»

Границы интервалов, %	Границы интервалов, в									
	Сдвиг, %									
	плюс 10,0	+7,5	+5,0	+2,5	100	-2,5	-5,0	-2,5	минус 10,0	
85,00	205,70	201,02	196,35	191,67	187,00	182,32	177,65	172,97	168,30	
88,75	241,77	209,89	205,01	200,13	195,25	190,37	185,49	180,60	175,72	
90,00	217,80	212,85	207,90	202,95	198,00	193,05	188,10	183,15	178,20	
92,50	223,85	218,76	213,67	208,59	203,50	198,41	193,32	188,24	183,15	
95,00	229,90	224,67	219,45	214,22	209,00	203,77	198,55	193,32	188,10	
96,25	232,92	227,63	222,34	217,04	211,75	206,46	201,16	195,87	190,57	
97,50	235,95	230,59	225,22	219,86	214,50	209,14	203,77	198,41	193,05	
98,75	238,97	233,54	228,11	222,68	217,25	211,82	206,39	200,96	195,52	
100,00	242,00	236,50	231,00	225,50	220,00	214,50	209,50	203,50	198,00	
101,25	245,02	239,46	233,89	228,32	222,75	217,18	211,61	206,04	200,47	
102,50	248,05	242,41	236,77	231,14	225,50	219,86	214,22	208,59	202,95	
103,75	251,07	245,37	239,66	233,96	228,32	222,54	216,84	211,13	205,42	
105,00	254,10	248,32	242,55	236,77	321,00	225,22	219,45	213,67	207,90	
107,50	260,15	254,24	248,32	242,41	236,50	230,59	224,67	218,76	212,85	
110,00	266,20	260,15	254,10	248,05	242,00	235,95	229,90	223,85	217,80	
111,25	269,22	263,11	256,99	250,87	244,75	238,63	232,51	226,39	220,27	
115,00	278,30	271,97	265,65	259,32	253,00	246,67	240,35	234,02	227,70	

Учебное издание

ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Составители

ДЕМЕНТЬЕВ Юрий Николаевич
ЛУКУТИН Борис Владимирович

Научный редактор
кандидат технических наук,
доцент

С.Н. Кладиев

Редактор

Р.Д. Игнатова

Верстка

Д.В. Сотникова

Дизайн обложки

О.Ю. Аршинова

О.А. Дмитриев

Подписано к печати 25.04.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 6,10. Уч.-изд. л. 5,52.

Заказ 405. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.