

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Омский государственный технический университет»

А.Д. ЭРНСТ

# **САМОЗАПУСК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Учебное пособие

Омск – 2006

УДК 000.0.000.0(000)  
ББК 31.27-02я73  
Э81

Рецензенты:

Б.Н. Коврижин, канд. техн. наук, доц., зам. нач. УПЦ  
МУПЭП «Омскэлектро»

Т.В. Комякова, канд. техн. наук, доц. ОмГУПС

Э81 Эрнст А.Д. **Самозапуск асинхронных электродвигателей:** Учеб. пособие.  
Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. 46 с.

Изложены основные положения расчетов самозапуска асинхронных электродвигателей узлов нагрузки в системах электроснабжения. Рассмотрены этапы расчетов в плане самостоятельной работы студентов при изучении дисциплины «Устойчивость узлов нагрузки электроэнергетических систем». Приведен сборник заданий, основные теоретические положения и примеры выполнения расчета самозапуска.

Для студентов дистанционной, очной, вечерней и заочной форм обучения специальности «Электроснабжение» для самостоятельной работы студентов, курсового и дипломного проектирования.

*Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Омского государственного технического университета*

**УДК 621.3.016.3(075)**

**ББК 31.27-02я73**

**© Автор, 2006**

**© Омский государственный  
технический университет, 2006**

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие предназначено для студентов дистанционной, очной, вечерней и заочной форм обучения специальности «Электроснабжение промышленных предприятий», изучающих дисциплину «Устойчивость узлов нагрузки электроэнергетических систем». Одним из основных требований, предъявляемых к электроснабжению промышленных предприятий является надежность питания потребителей. Она определяется конфигурацией схем электроснабжения, а также правильным использованием оборудования электроустановок. Правильное использование оборудования предполагает назначение эксплуатационных режимов в соответствии с техническими возможностями элементов системы электроснабжения и исключение при этом отклонений рабочих параметров от нормы. Особого внимания требуют переходные режимы электродвигателей.

Широкое использование устройств автоматизации позволяет значительно повысить надежность систем электроснабжения. Однако средства автоматизации обеспечивают должный эффект только в сочетании с самозапуском электродвигателей, то есть автоматическим восстановлением нормальной работы электропривода без вмешательства персонала после кратковременных перерывов электроснабжения или снижения напряжения. Характер нагрузки и требования к самозапуску оказывают влияние на выбор варианта схемы электроснабжения.

Неправильный расчет самозапуска может иметь следствием нарушения технологического процесса предприятия, повреждение оборудования, создание опасности для жизни и здоровья людей. Учитывая важность вопросов самозапуска и широкое использование этого режима в различных отраслях промышленности, содержанием курсовой работы выбраны переходные процессы в электродвигателях при самозапуске.

Приведенные в работе алгоритмы могут быть использованы для самостоятельной работы студентов (СРС), при курсовом и дипломном проектировании, а также при расчетах самозапуска в действующих и проектируемых системах электроснабжения промышленных предприятий.

Расчеты самозапуска ставят целью закрепление изучаемого теоретического материала по узловым вопросам курса и приобретение навыков практического решения инженерных задач, относящихся к расчетам устойчивости узлов нагрузки. В пособии дан сборник вариантов заданий, рассмотрены этапы расчетов самозапуска асинхронных электродвигателей, приведены примеры расчетов и графический материал для наглядного представления картины протекания процессов, а также библиографический список.

## 1 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАСЧЕТОВ

Целью расчетов самозапуска является выявление и обеспечение условий автоматического повторного включения асинхронных электродвигателей для того, чтобы обеспечить их динамическую устойчивость при кратковременных перерывах электроснабжения [1].

Выполнение расчетов позволяет студентам лучше усвоить взаимосвязь процессов, происходящих в двигателях при самозапуске со схемами управления двигателями и с параметрами пусковых устройств элементов автоматики и релейной защиты систем электроснабжения.

Процесс расчета самозапуска требует решения следующих вопросов:

- определения параметров двигателей, механических характеристик и характеристик моментов сопротивления по каталожным данным;
- расчета сопротивлений электродвигателей в зависимости от скольжения;
- расчета выбега электродвигателей за время перерыва электроснабжения и определения скольжения к моменту восстановления питания;
- оценки возможности самозапуска и обеспечение условий самозапуска;
- расчета разгона электродвигателей при самозапуске и определения времени разгона;
- определения превышения температуры обмоток электродвигателей за время разгона.

Текст задания для типового расчета самозапуска при выполнении СРС приведен в прил. А.

## 2 СБОРНИК ЗАДАНИЙ

Расчет выполняется в соответствии с индивидуальным заданием. Текст задания приведен в Прил. А. Исходные данные для расчета берутся в соответствии с шифром, выданным преподавателем, состоящим из комбинации цифровых обозначений, например:

1.2.3.9.5.6

Первая цифра (1) вариант схемы питания согласно рис. 2.1;

Вторая цифра (2) вариант исходных данных схемы питания и распределения по данным табл. 2.1;

Третья цифра (3) номер расчетной точки схемы распределения на рис. 2.2;

Четвертая цифра (9) вариант блока двигателей согласно табл. 2.3;

Пятая цифра (5) вариант параметров механизмов согласно табл. 2.2;

Шестая цифра (6) время перерыва электроснабжения согласно табл. 2.4.

Студент, получивший задание, должен в первую очередь составить схему электроснабжения из схем, приведенных на рис. 2.1-2.3.

Согласно вариантам рис. 2.1 может быть представлено три вида схем питания. Отличия могут состоять только в наличии или отсутствии реакторов (в зависимости от варианта). Выбранная схема питания соединяется со схемой распределения представленной на рис. 2.2.

Согласно вариантам табл. 2.3 выбирается схема блоков, из вариантов представленных на рис. 2.3, и соединяется со схемой распределения с учетом варианта расчетной точки на схеме.

Пример схемы представлен на рис. 2.4 для варианта 2.7.2.3.1.7. Следует отметить что, согласно заданию в схеме распределения напряжение на шинах 1 и 2 может принимать значение 6 кВ и 10 кВ, а на шинах 3 0,38 кВ или 0,66 кВ.

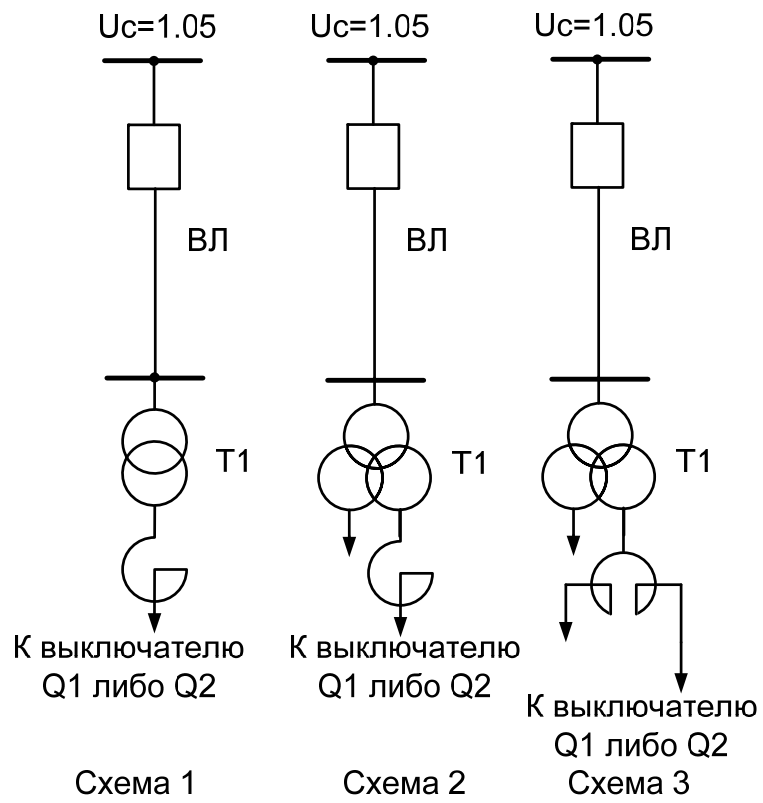


Рисунок 2.1 – Варианты схем питания

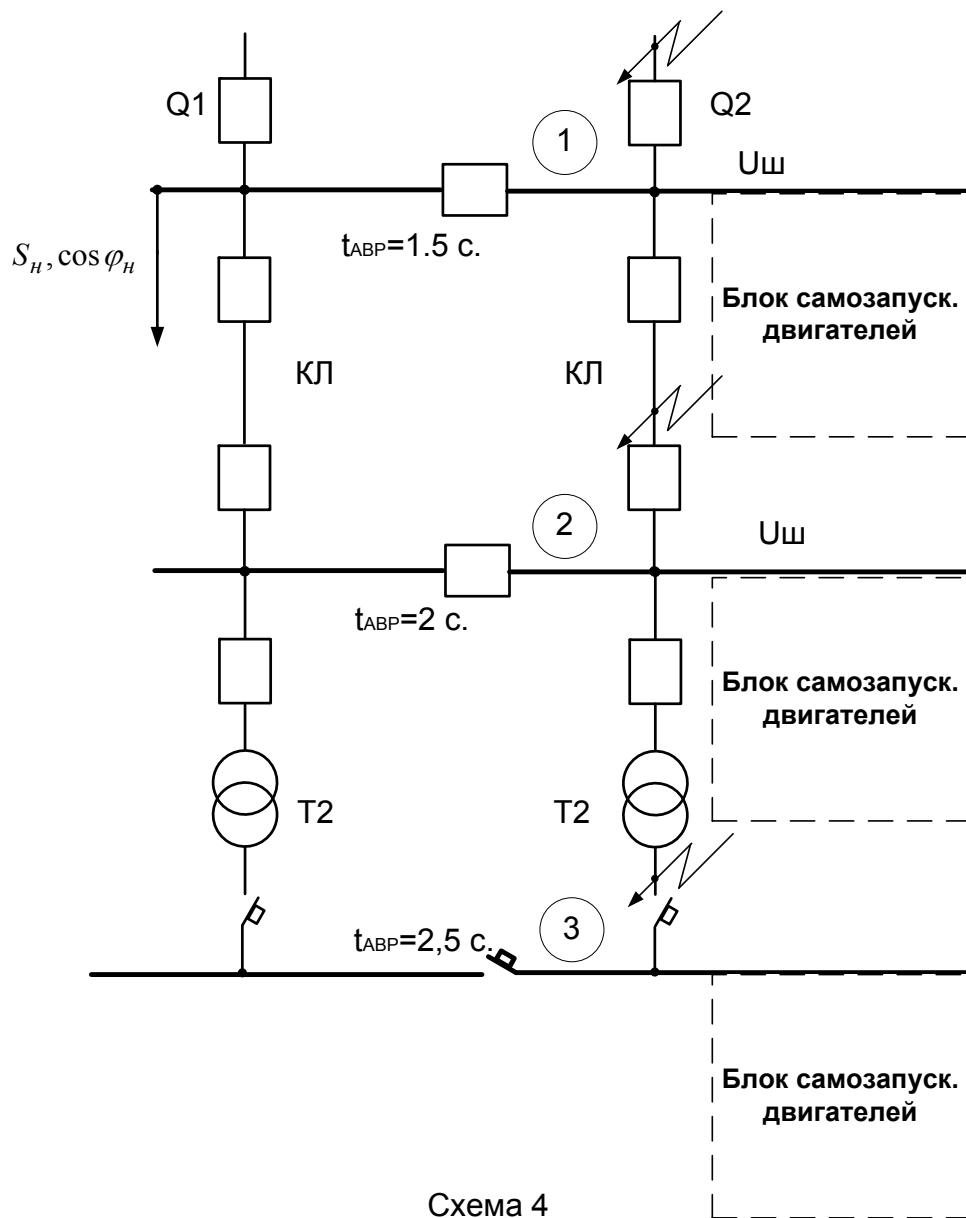


Рисунок 2.2 – Схема распределения

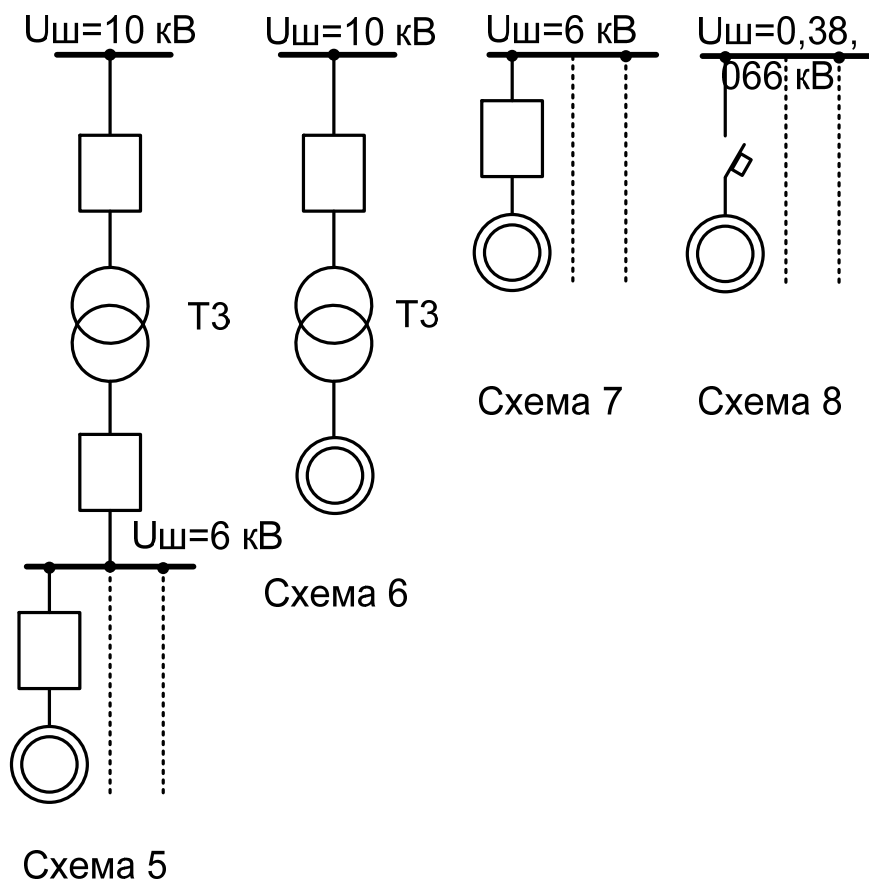


Рисунок 2.3 – Примеры блоков двигателей для схемы изображенной на рис. 2.2



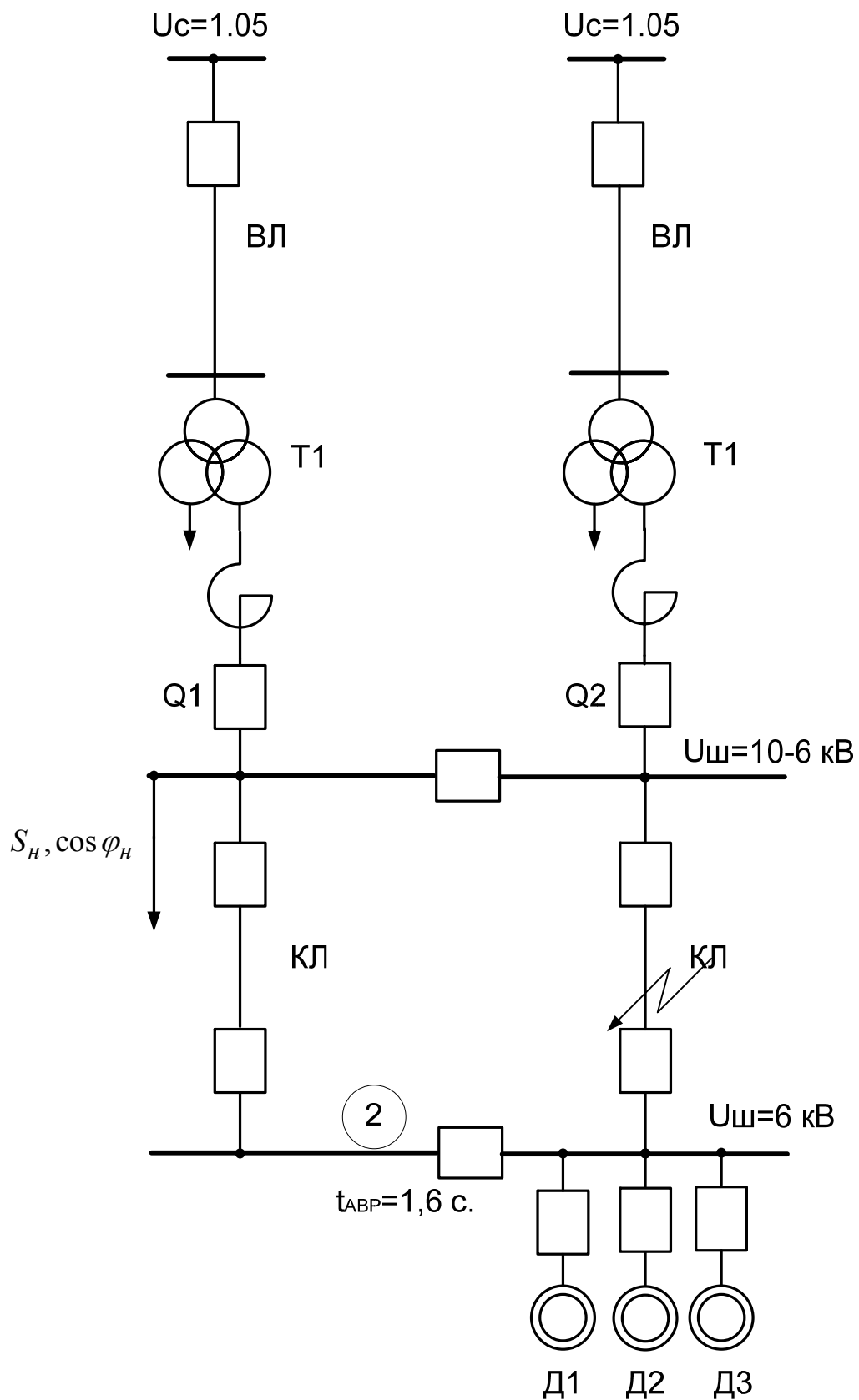


Рисунок 2.4 – Пример расчетной схемы сети собранной согласно шифру 2.7.2.3.1.7

Таблица 2.1 – Исходные данные трансформаторов, реакторов, ВЛ, КЛ, и нагрузки

№ Вар.	ВЛ (км)	T1	Реактор	S <sub>H</sub> (МВА)	cos φ <sub>H</sub>	КЛ (км)	T2
1	10	ТМН-6300/110/6/10	-	4	0,7	1	ТМ-630/6/0.4
2	20	ТДН-10000/110/6/10	-	10	0,75	2	ТМ-160/6/0.4
3	50	ТДН-16000/110/6/10	-	12	0,8	3	ТМ-400/6/0.4
4	40	ТДН-25000/110/6/10	РБ-10-1600-0,1	15	0,85	1	ТМ2500/6/0.4
5	20	ТДН-25000/110/6/10	-	5	0,8	3	ТМ1600/6/0.4
6	40	ТРДН-25000/110/6/10	-	6	0,8	3	ТМ630/6/0.4
7	20	ТРДН-40000/110/6/10	РБ-10-2500-0,1	10	0,85	2	ТМ1000/6/0.4
8	30	ТРДН-63000/110/6/10	РБ-10-2500-0,11	15	0,9	1	ТМ1600/6/0.4
9	50	ТРДН-40000/110/6/10	-	15	0,85	1	ТМ1000/6/0.4
10	20	ТРДН-63000/110/6/10	РБ-10-2*2500-0,2	8	0,9	2	ТМ1600/6/0.4
11	30	ТРДН-80000/110/6/10	РБ-10-2*2500-0,14	10	0,95	3	ТМ2500/6/0.4

Таблица 2.2 – Варианты параметров механизмов

Число двигателей	Номер варианта согласно шифру задания.																													
	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10		
	γ	m <sub>ГР</sub>	k <sub>3</sub>	γ	m <sub>ГР</sub>	k <sub>3</sub>	γ	m <sub>ГР</sub>	k <sub>3</sub>	γ	m <sub>ГР</sub>	k <sub>3</sub>	γ	m <sub>ГР</sub>	k <sub>3</sub>	γ	m <sub>ГР</sub>	k <sub>3</sub>	γ	m <sub>ГР</sub>	k <sub>3</sub>	γ	m <sub>ГР</sub>	k <sub>3</sub>	γ	m <sub>ГР</sub>	k <sub>3</sub>	γ	m <sub>ГР</sub>	k <sub>3</sub>
1	3	0,2	1	1	0,4	1	2	0,6	1	0	1	1	1	1	1	2	0,5	1	3	0,4	1	1	0,6	1	2	0,8	1	2	1	1
2	1	0,5	1	3	0,2	1	2	1	1	1	0,8	1	2	0,1	1	2	0,6	1	0	0,4	1	0	0,8	1	1	1	1	2	0,8	1
	1	0,5	1	3	0,2	1	2	1	1	3	0,6	1	3	0,5	1	1	1	1	1	0,6	1	2	0,8	1	2	0,4	1	1	1	1
3	2	0,1	1	1	0,2	1	3	0,6	1	2	1	1	2	0,5	1	1	0,8	1	2	0,8	1	1	0,4	1	0	1	1	1	0,5	1
	2	0,2	1	1	0,5	1	3	0,6	1	1	1	1	3	1	1	2	0,8	1	1	0,4	1	2	0,6	1	1	0,2	1	2	0,5	1
	2	0,4	1	1	0,2	1	3	0,6	1	0	1	1	3	1	1	2	0,8	1	2	0,6	1	1	0,6	1	2	0,2	1	2	0,5	1

Таблица 2.3 – Варианты блоков самозапускающихся двигателей и механизмов

№ Вар.	Трансформатор ТЗ	Двигатель.									Механизм.
			$P_n$ (кВт)	$\eta$ (%)	$S_n$ (%)	$\cos\varphi_n$	$m_n$	$m_{max}$	$\frac{I_n}{I_H}$	J (кг.м <sup>2</sup> )	
1	ТМН-6300/10/6	4А3М-5000 УХЛ4	5000	97.5	0.6	0.9	0.9	2.2	5.7	56	40
2		4А3М-8000 УХЛ4	8000	97.6	0.5	0.9	0.95	2.3	6	148	160
		4А3М-2000 УХЛ4	2000	96.7	0.9	0.88	0.77	1.9	4.7	21	60
3		4А3М-8000 УХЛ4	8000	97.6	0.5	0.9	0.95	2.3	6	148	160
		4А3М-8000 УХЛ4	-	-	-	-	-	-	-	-	150
		4А3М-8000 УХЛ4	-	-	-	-	-	-	-	-	80
4	-	4А3М-5000 УХЛ4	5000	97.5	0.6	0.9	0.9	2.2	5.7	56	40
5	ТДН10000/10/6- -	4А3М-2000 УХЛ4	2000	96.7	0.9	0.88	0.77	1.9	4.7	21	60
		4А3М-4000 УХЛ4	4000	97.3	0.6	0.89	0.9	2.2	5.7	24	60
6	ТДН-16000/35/6-	4А3М-2500 УХЛ4	2500	97	0.9	0.89	0.85	2	5	24	20
		4А3М-2500 УХЛ4	-	-	-	-	-	-	-	-	20
		4А3М-2500 УХЛ4	-	-	-	-	-	-	-	-	20
7	-	4А3М-8000 УХЛ4	8000	97.6	0.5	0.9	0.95	2.3	6	148	160
		4А3М-8000 УХЛ4	-	-	-	-	-	-	-	-	150
		4А3М-6300 УХЛ4	6300	97.6	0.6	0.9	0.95	2.2	5.9	64	80
8	-	4А3М-3150 УХЛ4	3150	97.2	0.8	0.9	0.9	2.1	5.3	29	70
		4А3М-6300 УХЛ4	6300	97.6	0.6	0.9	0.95	2.2	5.9	64	60
9	-	4А280М8У3	75	95.2	2.2	0.85	1.5	2	5.5	4.1	2
10	-	4А250М8У3	45	91	1.4	0.84	1.2	2	6	1.4	2
		4А315С8У3	90	93	1.5	0.85	1.2	2.3	6.5	4.9	5
11	-	4А280С8У3	55	92	2.2	0.84	1.2	2	5.5	3,2	3
		4А280С8У3	-	-	-	-	-	-	-	-	3
		4А280С8У3	-	-	-	-	-	-	-	-	3
12	-	4А355С8У3	160	93.5	1.3	0.85	1.2	2.2	6.5	10	15
		4А315М8У3	110	93	1.5	0.85	1.2	2.2	6.5	9.0	15
13	-	4АН355М2У3	400	95	1	0.92	1.9	1	6.5	2.8	5
		4АН355М8У3	200	94	1.8	0.86	1.1	1.9	5.5	13	10
		4АН355С8У3	160	93.5	1.8	0.86	1.1	1.9	5.5	10	10

Таблица 2.4 – Варианты времени короткого замыкания

Номер точки	Время короткого замыкания [с.]						
	Номер варианта						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1,2	1,8	1,5	2	0,9	1,1	2
2	0,8	1,2	1	1,5	0,6	0,9	1,6
3	0,4	0,8	0,5	1	0,3	0,6	0,9

### 3 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЖИМА САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

#### 3.1 Применение самозапуска

Самозапуском называется процесс восстановления нормальной работы электропривода без вмешательства персонала после кратковременного перерыва электроснабжения или глубокого снижения напряжения [1]. Самозапуск считается обеспеченным, если после восстановления напряжения агрегат разогнался до нормальной угловой скорости и продолжает длительно работать с нормальной производительностью приводимого механизма и нагрузкой электродвигателя.

Самозапуск электродвигателей позволяет наиболее полно использовать средства автоматизации систем электроснабжения. Если повреждение, вызвавшее прекращение питания или глубокое снижение напряжения, быстро ликвидировано действием релейной защиты и устройств автоматики, то при обеспеченном самозапуске это не является аварией или браком в работе системы электроснабжения и ущерба практически не возникает. Если же самозапуск не обеспечен, двигатели останавливаются, и хотя устройства автоматики сработали, ущерб может быть значительным, особенно при расстройстве сложного технологического цикла (например, в химической промышленности).

Самозапуск может происходить после кратковременного глубокого снижения напряжения, вследствие близкого короткого замыкания (КЗ), отключаемого релейной защитой. При этом в самозапуске будут одновременно участвовать те двигатели, у которых напряжение снизилось до значения, вызвавшего снижение угловой скорости. Двигатели все время остаются подключенными к источникам питания.

Другим случаем является самозапуск после кратковременного перерыва электроснабжения при срабатывании устройств автоматического ввода резерва (АВР) или автоматического повторного включения (АПВ). Здесь в самозапуске участвуют одновременно все двигатели, которые при исчезновении напряжения отключались от источников питания и были вновь подключены к ним после действия автоматики.

Выключатели электродвигателей напряжением выше 1000 В, подлежащих самозапуску, в большинстве случаев во время перерыва электроснабжения остаются включенными. Двигатели, самозапуск которых не может быть обеспечен или не требуется по условиям производства, должны до восстановления напряжения отключиться от сети своими выключателями с помощью реле минимального напряжения, частотных реле и т. д.

Двигатели напряжением до 1000 В, включенные через магнитные пускатели либо контакторы, в самозапуске не участвуют. Если самозапуск таких двигателей необходим, применяются устройства АПВ контактора (магнитного пускателя), действующие при восстановлении напряжения, либо различного рода задержки, сохраняющие включенное положение контактора.

Самозапуск асинхронных и синхронных электродвигателей начал применяться на тепловых электростанциях и в настоящее время он получил широкое распространение во многих отраслях промышленности, особенно со сложными непрерывными технологическими процессами. Обоснованное применение самозапуска в сочетании со средствами автоматики всегда приводит к повышению надежности электроснабжения и уменьшению простоев механизмов. В некоторых случаях, кроме того, обеспечивается снижение эксплуатационных расходов (за счет уменьшения персонала, снижения потерь электроэнергии и др.) и капитальных затрат.

Обеспечение самозапуска требует комплексного решения вопросов, связанных с работой электродвигателя и его системы управления, электрической сети, а также самого приводимого механизма. В некоторых случаях самозапуск может быть запрещен по условиям техники безопасности или технологии производства. Например, самозапуск может оказаться недопустимым для компрессорных установок, работающих с взрывоопасными агентами. Нецелесообразен самозапуск крановых механизмов и т. д. в тех случаях, когда самозапуск не только бесполезен, но и опасен для персонала, могут применяться специальные устройства для его запрета.

Во всех случаях осуществление самозапуска должно быть обоснованным. Его следует применять только для тех механизмов, для которых он действительно необходим. Главная задача самозапуска – сохранить работоспособность технологической линии или агрегата при кратковременном нарушении электроснабжения. Нужно учитывать, что нередко восстановление питания после его аварийного прекращения происходит в условиях сниженной суммарной мощности источника питания (например, при аварийном отключении одного из двух вводов цеховой подстанции и автоматическом переводе всей ее нагрузки на другой ввод). Неоправданное увеличение суммарной мощности электродвигателей, участвующих в самозапуске, может в этих условиях привести к отрицательным результатам. В большинстве химических производств на время нарушения электроснабжения бывает достаточно сохранить циркуляцию раствора, необходимую температуру и давление компонентов, чтобы предотвратить кристаллизацию или другие необратимые изменения. Доменная печь может быть переведена на «тихий ход» с сохранением работы систем охлаждения и дутья во избежание образования «козла». Это особенно

целесообразно при полном прекращении питания со стороны энергосистемы, когда остаются в работе лишь отделившиеся от нее генераторы собственной ТЭЦ с ограниченной суммарной мощностью.

Если мощность системы электроснабжения достаточна, в одновременном самозапуске могут участвовать все электродвигатели, для которых он необходим. Если же ограниченная мощность системы электроснабжения этого не допускает, то предусматривается несколько ступеней самозапуска, то есть поочередный или каскадный самозапуск нескольких групп двигателей.

В зависимости от длительности перерыва электроснабжения возможны два основных случая самозапуска: либо двигатель имеет какую-то остаточную угловую скорость к моменту восстановления напряжения, либо он успевает остановиться. Во втором случае, если время перерыва питания велико, персонал может, не зная причин остановки двигателя, начать какие-либо работы на механизме, что в свою очередь может привести к несчастному случаю. Это требует блокирования самозапуска при длительных перерывах электроснабжения.

### 3.2 Краткая характеристика процессов при самозапуске двигателей

В процессе самозапуска происходят изменения токов, напряжения и частоты вращения двигателей [2]. На рис. 3.1 показаны диаграммы изменения напряжения, тока, частоты вращения двигателей при их переводе на резервное питание. После отключения рабочего источника питания в момент времени  $t_1$ , напряжение на выводах двигателей становится равным нулю, и начинается торможение. В момент времени  $t_2$  включается резервный источник питания. На выводах двигателей вновь появляется напряжение, и они начинают разгоняться. Таким образом, весь процесс самозапуска можно разделить на четыре этапа [1].

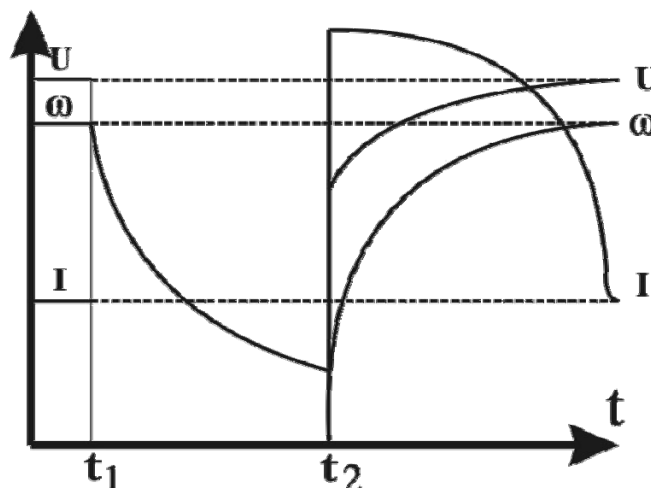


Рисунок 3.1 – Диаграмма токов, напряжения и частоты вращения двигателя при действии АВР

**Первый этап – выбег агрегатов**, который зависит от причины нарушения электроснабжения и может быть *индивидуальным*, когда выбегающие двигатели не оказывают заметного влияния друг на друга, и *групповым*, когда взаимное влияние двигателей значительно.

*Индивидуальный выбег* происходит при отключении одиночного двигателя. Кроме того, можно считать индивидуальным выбег группы двигателей при отключении питания, если они однотипны и одинаково загружены; при КЗ. на смежных элементах сети, а также в случае, если электрическая цепь между рассматриваемым и другими двигателями содержит реактор или трансформатор. Во всех этих случаях отсутствует или является незначительным обмен электромагнитной мощностью между двигателями, т.е. последние не оказывают существенного влияния друг на друга.

Величина остаточной частоты вращения в любой момент времени после отключения питания определяется моментом инерции агрегата и коэффициентом загрузки двигателя ( $k_3$  - это момент сопротивления механизма при номинальной частоте вращения, выраженный в долях номинального момента двигателя), а также видом механической характеристики приводимого механизма.

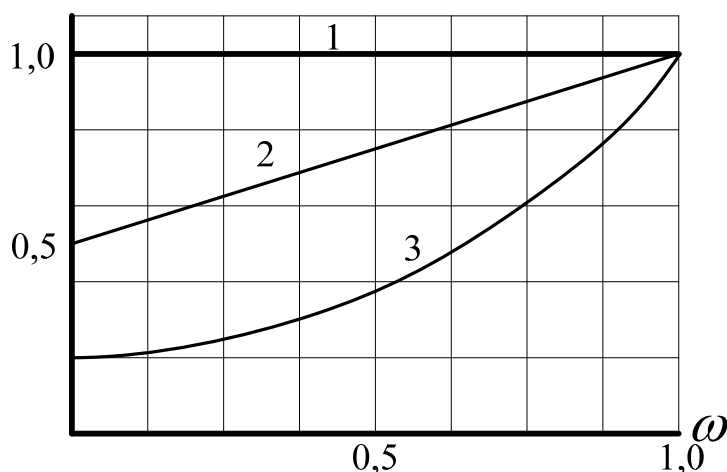


Рисунок 3.2 – Зависимость момента сопротивления механизма от частоты вращения ( $k_3=1,0$ ), 1 -  $m_{мех} = const$ , 2 -  $m_{мех} \propto \omega$ , 3 -  $m_{мех} \propto \omega^2$

На рис. 3.2 показаны кривые моментов сопротивления для различных типов механизмов. Если перерыв питания вызван не отключением, а наличием близкого короткого замыкания, выбег происходит по более крутой характеристике, так как двигатель переходит в генераторный режим и посылает к месту КЗ ток, равный примерно своему пусковому току и создающий дополнительный тормозной момент на валу. Причем степень влияния *генераторного момента*  $m_k$  на торможение у асинхронного и синхронного двигателя будет различной.

В асинхронном двигателе ток подпитки КЗ, создающий дополнительный тормозной момент затухает менее чем через 0,3 с. Дополнительное торможение за это время по сравнению с индивидуальным выбегом при той же нагрузке

оставляет (0,8-3)% в зависимости от вида характеристики механизма и в дальнейшем не будет учитываться.

На диаграмме, рис. 3.1 для простоты показано, что в момент отключения питания напряжение на выводах двигателей исчезло мгновенно. На самом деле у отключенных, но вращающихся двигателей имеется остаточная эдс.

При внезапном отключении от сети напряжение на выводах статора асинхронного двигателя снижается от номинального значения до величины переходной эдс (0,86-0,95 от номинального напряжения). В дальнейшем эдс, развиваемая индивидуально выбегающим двигателем затухает значительно быстрее, чем происходит снижение частоты вращения. Сказанное иллюстрируется рис. 3.3 на котором приведена осциллограмма эдс асинхронного двигателя.

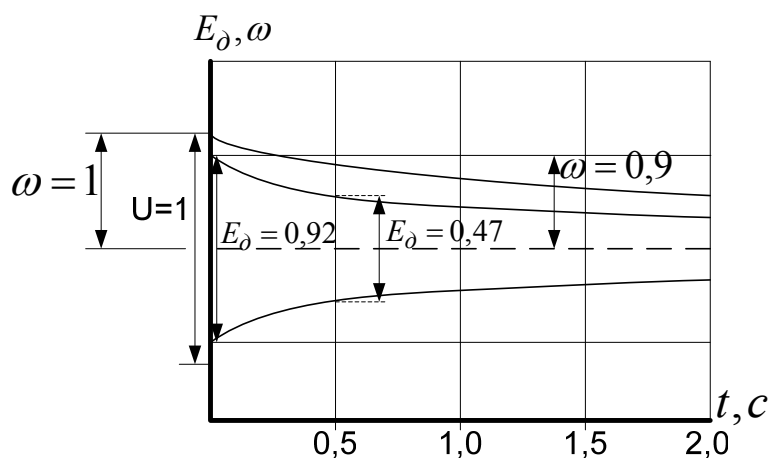


Рисунок 3.3 – Выбег асинхронного двигателя

*Групповой выбег* происходит при одновременном отключении группы разнотипных или неодинаково нагруженных двигателей, питающихся от одной секции шин источника питания промышленного предприятия. В этом случае происходит обмен электромагнитной мощностью между двигателями, в результате чего характеристики группового выбега отличаются от характеристик выбега индивидуального.

Групповой, выбег синхронных и асинхронных двигателей на значительном интервале времени является синхронным (до тех пор, пока напряжение на выводах не снизится до величины 0,25-0,4 $U_H$ ). Если в выбеге одновременно участвуют синхронные и асинхронные двигатели, то возникает генераторный момент от токов возбуждения. Однако величина этого момента значительно меньше, чем при КЗ.

За счет взаимного обмена электромагнитной мощностью двигателя с меньшими моментами инерции выбегают в двигательном режиме, т.е. медленнее, чем при индивидуальном выбеге; а двигатели с большими моментами инерции выбегают в генераторном режиме, т.е. быстрее. Скорости выбега разнородных двигателей выравниваются, что и обуславливает их синхронный выбег.

Характер изменения частота вращения при групповом выбеге асинхронного и синхронного двигателей показан на рис. 3.4.



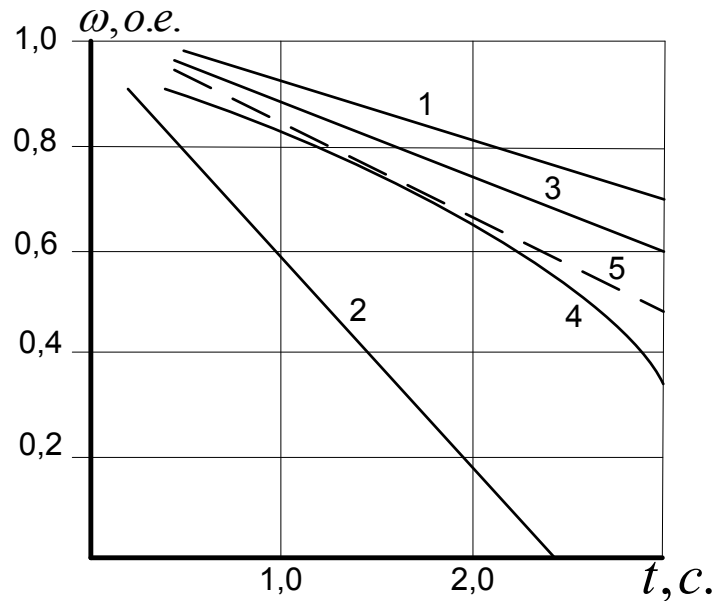


Рисунок 3.4 – Изменение частоты вращения синхронного и асинхронного двигателей при выбеге ( $T_{jCD} = 2,5 \text{ с}$ ,  $T_{jAD} = 10 \text{ с}$ ).

1,2 – при индивидуальном выбеге; 3,4 – при групповом выбеге; 5 – синхронная частота эквивалентного двигателя при групповом выбеге

**Второй этап – оценка возможности самозапуска**, которая сводится к сравнению развиваемого двигателем электромагнитного момента ( $M_{эсэ}$ ) с механическим моментом сопротивления ( $M_{сэс}$ ) при восстановлении электроснабжения. При этом электромагнитный момент должен превышать механический момент сопротивления [3]:

$$M_{эсэ} \geq 1,1M_{сэс}. \quad (3.1)$$

Одновременно на этом этапе расчета необходимо обеспечить допустимое снижение напряжения на шинах нагрузки, обычно  $U_{дон} \geq 0,7U_{ном}$ .

**Третий этап – разгон и восстановление рабочего режима.**

После восстановления питания начинается *разгон двигателя*. На этом этапе самозапуск отличается от пуска наличием следующих особенностей [3]:

1. В самозапуске участвует группа электродвигателей, что увеличивает токи в питающих элементах, приводит к снижению напряжения на зажимах двигателей и уменьшению их вращающего электромагнитного момента;

2. В момент восстановления питания двигателей часть двигателей или все двигатели вращаются с остаточной скоростью. Так как в момент появления напряжения двигатель имеет остаточную эдс происходит его несинхронное включение. Максимальное значение периодической составляющей тока включения будет иметь место, если напряжение питающей сети и эдс двигателя находятся в противофазе. В некоторых случаях токи самозапуска могут превышать значения пусковых токов. Это возможно, например, при быстром АПВ или АВР, когда эдс двигателей, временно отключенных от питающей систе-

мы не успеют значительно снизиться. При этом токи самозапуска мощных асинхронных двигателей иногда на несколько десятков процентов, а синхронных более чем в два раза, превышают пусковые. Возникающие при этом динамические усилия могут вызывать недопустимую деформацию обмоток, а моменты вращения, передающиеся по валу двигателя, в ряде случаев представляют опасность для целостности последнего.

Постоянные времени, определяющие скорость затухания электромагнитных переходных процессов, в асинхронных электродвигателях обычно малы: свободный ток затухает уже через 0,04-0,06 с. Поэтому электромагнитные процессы, как правило, не оказывают заметного влияния на протекание электромеханического процесса самозапуска, и ими обычно пренебрегают.

3. Самозапуск происходит, как правило, при нагруженных механизмах, что приводит к увеличению времени разгона и повышению температуры обмоток.

По мере разгона (смотри рис. 3.1) ток двигателя снижается, а напряжение на его выводах повышается. Такой характер зависимости обусловлен тем, что сопротивление двигателя изменяется в зависимости от частоты вращения.

При расчетах самозапуска без учета электромагнитных переходных процессов можно воспользоваться упрощенной формулой для определения зависимости индуктивного сопротивления асинхронного двигателя от скольжения:

$$x_{(s)} = \frac{x_0}{1 + \frac{x_0 - x''}{x''} s^{-\frac{1}{\ln s_{кр}}}} \quad (3.2)$$

При упрощенном расчете следует принимать  $x_{(s)} = x'' = \frac{1}{I_{*пуск}}$  равное сверхпереходному сопротивлению при известной кратности пускового тока двигателя  $I_{*пуск}$ . Напряжение в этом случае остается неизменным и равным напряжению в начальный момент самозапуска.

На рис. 3.5 приведена зависимость сопротивления от скольжения для асинхронного двигателя.

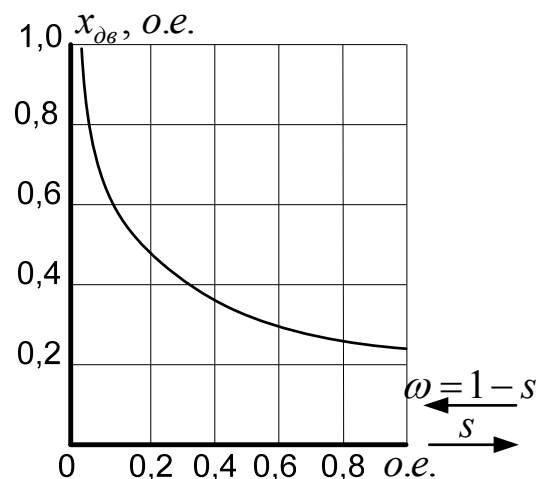


Рисунок 3.5 – Изменение сопротивления двигателя от скольжения.

Анализ возможности самозапуска и расчет разгона двигателей при самозапуске проводят с помощью характеристик электромагнитного момента, соответствующих установившимся режимам. Подобные характеристики, как известно, называются *статическими* [4].

Характеристика электромагнитного асинхронного момента двигателя от скольжения при изменяющемся напряжении на выводах может быть при ряде приближений построена при помощи формулы [2]:

$$m_a = \frac{(2 + q) m_m U_\partial^2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + q}. \quad (3.3)$$

Характеристика электромагнитного асинхронного момента двигателя от скольжения при постоянном напряжении на выводах:

$$m_a = \frac{(2 + q) m_m}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + q}, \quad (3.4)$$

где  $s_{кр}$  - критическое скольжение двигателя, соответствующее максимальному асинхронному моменту:

$$s_{кр} = s_n \left( m_m + \sqrt{m_m^2 - 1} \right); \quad (3.5)$$

$$q = \frac{\left( s_{кр} + \frac{1}{s_{кр}} \right) \frac{m_n}{m_m} - 2}{1 - \frac{m_n}{m_m}}. \quad (3.6)$$

На рабочем участке характеристики асинхронного электромагнитного момента возможно применение формулы Клосса:

$$m_a = \frac{2 m_m U_\partial^2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}, \quad (3.7)$$

где  $s_{кр} = \frac{R_2}{x_s}$ .

При расчетах пуска и самозапуска двигателей следует использовать формулу (3.3). Более точно зависимость асинхронного момента от скольжения может быть определена экспериментально. Электромагнитный момент асинхронного двигателя представляет собой вращающий асинхронный момент, обусловленный взаимодействием наведенных токов ротора с полем статора. Характер асинхронного момента представлен на графической зависимости рис. 3.6.

Из выражения (3.3) видно, что если напряжение на выводах двигателя отличается от номинального, то величина асинхронного момента изменяется пропорционально квадрату напряжения.

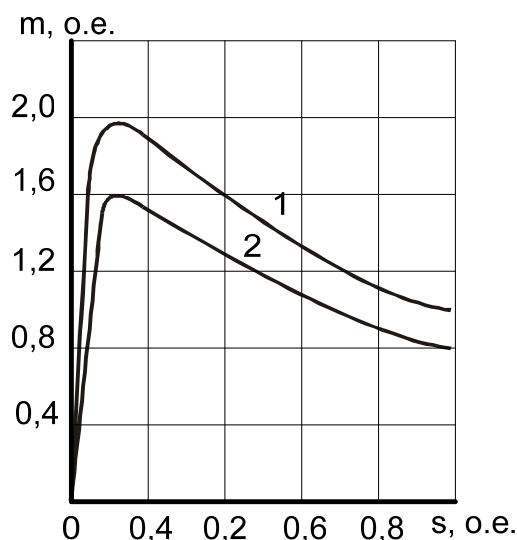


Рисунок 3.6 – Вращающий момент асинхронного двигателя при различном напряжении на его выходах. 1 – при  $U = U_n$ ; 2 – при  $U = 0,9U_n$

При выполнении условия (3.1) самозапуск считается обеспеченным.

**Четвертый этап - расчет нагрева электродвигателей**, который производится совместно с третьим этапом и сводится к вычислению теплового импульса без учета передачи тепла в окружающую среду. Упрощенное решение этой задачи дано в разделе 6.

При реализации всех этапов расчета в дальнейшем возможно использовать два основных подхода. Первый основан на расчетах без учета электромагнитных переходных процессов. В этом случае предполагается, что электромагнитные моменты изменяются мгновенно, а анализ выбега на короткое замыкание и разгона двигателей производится с помощью характеристик электромагнитного момента, соответствующих установившимся режимам, то есть *статическим* характеристикам. Второй подход связан с учетом как механических, так и электромагнитных процессов [5]. Уравнения электромагнитных процессов являются упрощенной системой уравнений, построенной на основе уравнений Парка-Горева [6]. Реализация такого подхода значительно сложнее, чем первого и в данной работе не рассматривается.

### 3.3 Уравнения движения при самозапуске

Основные этапы расчета – выбег и разгон электродвигателей требуют решения дифференциальных уравнений описывающих механические и электромагнитные процессы в двигателях, то есть электромеханические процессы. Решение, ввиду нелинейности уравнений, может быть произведено только численным методом, в качестве которого может быть использован любой известный метод численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений [7]. На этапе выбега для некоторых видов механических характеристик решение может быть произведено аналитически [4].

Процессы выбега и разгона каждого двигателя без учета электромагнитных переходных процессов анализируются с помощью численного решения уравнения движения [3]:

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = m_a - m_c = \Delta m; \quad (3.8)$$

или

$$T_j \frac{ds}{dt} = m_c - m_a = -\Delta m, \quad (3.9)$$

Время разгона может быть найдено либо решением (3.8), (3.9) каким либо численным методом, например, методом Эйлера до получения стационарного значения  $s_0$  после разгона по алгоритму, отраженному на блок схеме рис. 6.1, либо при известном конечном значении  $s_0$  путем сведения этих уравнений к интегралу и численном его нахождении. Так для уравнения (4.8) решение принимает вид:

$$t_p = -T_j \int_{s_{cc}}^{s_0} \frac{ds}{\Delta m} \approx -T_j \sum_{i=1}^n \frac{\Delta s_i}{\Delta m_i}. \quad (3.10)$$

За счет разности вращающего асинхронного момента и момента сопротивления механизма асинхронный двигатель разгоняется до номинальной частоты вращения и на этом его самозапуск заканчивается.

При расчете выбега и разгона необходимо знание момента сопротивления механизма в зависимости от скольжения, который может быть задан либо в табличном виде с последующей интерполяцией в процессе расчета, либо аналитической зависимостью вида:

$$M_c = M_{mp} + (k_3 M_n - M_{mp}) \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^\gamma, \quad (3.11)$$

или при расчетах в относительных единицах (о.е.):

$$m_c = m_{mp} + (k_3 - m_{mp}) \omega_*^\gamma, \quad (3.12)$$

либо

$$m_c = m_{mp} + (k_3 - m_{mp})(1 - s)^\gamma. \quad (3.13)$$

Здесь  $m_{mp}$  - начальный момент при  $s = 1$  или  $\omega = 0$ ;

$$k_3 = \frac{m(s=0)}{m_n} - \text{коэффициент загрузки};$$

$\gamma$  - показатель степени, характеризующий механизм [2].

Для механизмов с постоянным моментом сопротивления  $\gamma = 0$ . К ним относятся транспортеры, дробилки, шаровые мельницы, поршневые компрессоры. Для линейной зависимости  $m_{c(\omega)} - \gamma = 0$ . К таким механизмам можно отнести систему двигатель-генератор. Для механизмов с вентиляторной механической характеристикой, к которым относятся центробежные насосы, вентиляторы,  $\gamma = 2$ . В ряде случаев показатель степени  $\gamma$  может достигать  $\gamma = 3$ .

Внешний вид механических характеристик при  $k_3 = 1$  и  $m_{mp} = 0,2$  приведен на рис. 3.7.

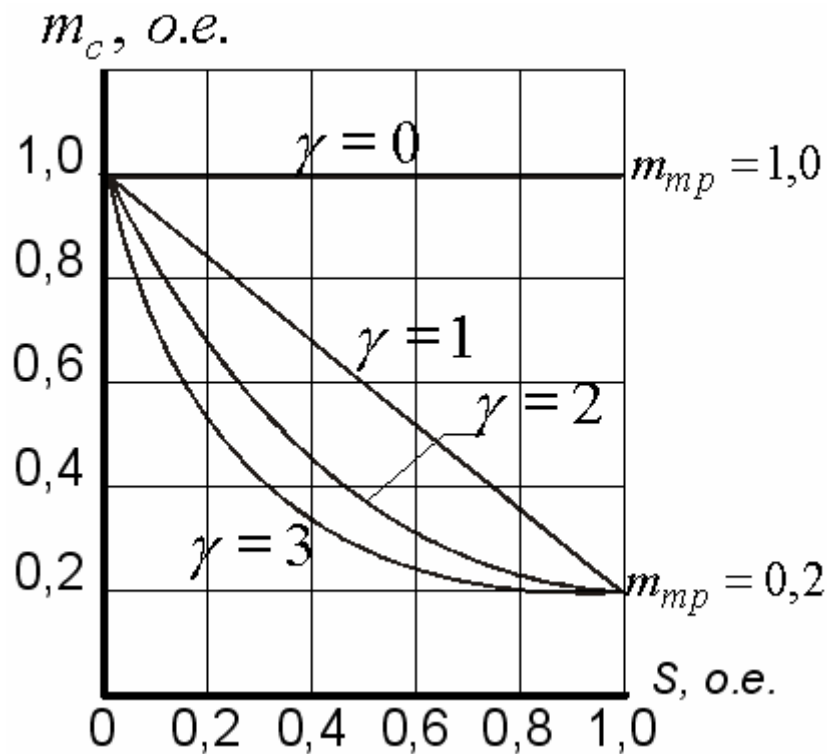


Рисунок 3.7 – Механические моменты сопротивления механизмов

Важной механической характеристикой агрегата является его приведенный момент инерции:

$$J_{np} = J_{\partial} + J_{mex.np} = J_{\partial} + J_{mex} \left( \frac{\omega_{н.мех}}{\omega_{н.д}} \right)^2, \quad (3.14)$$

где  $J_{\partial(mex)} = \frac{GD^2}{4}$  ( $кг \cdot м^2$ ) – приведенный момент инерции для двигателя (механизма) [2];

$\omega_{н.мех}$ ,  $\omega_{н.д}$  номинальные угловые скорости механизма и двигателя.

В расчетах чаще имеют дело с электромеханической постоянной времени агрегата численно равной времени ускорения (замедления), агрегата (с) двигатель-механизм при постоянном моменте сопротивления равной

$$T_{j.н.} = J_{np} \frac{\omega_0}{M_n} = J_{np} \frac{\omega_0 \omega_n}{P_n} \approx J_{np} \frac{\omega_0^2}{P_n}, \quad (3.15)$$

где  $\omega_0$  и  $\omega_n$  - синхронная и номинальная угловые скорости ( $с^{-1}$ );

$M_n$  - номинальный вращающий момент двигателя ( $Н \cdot м$ );

$P_n$  - номинальная активная мощность двигателя (Вт).

Угловая скорость может быть выражена через частоту вращения  $n$  (об/мин):

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (3.16)$$

В тех случаях, когда постоянные времени или время необходимо выразить в относительных единицах, можно воспользоваться соотношением:

$$t_* = \frac{t_{[c]}}{t_{\delta}} = \omega_0 t_{[c]} = 314 t_{[c]} \quad (3.17)$$

В последующих разделах подробно рассмотрены этапы расчета самозапуска с численными примерами.

## 4 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ВЫБЕГА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

### 4.1 Параметры и характеристики асинхронных двигателей

В зависимости от принятого метода расчета самозапуска и типа электродвигателей к схемам замещения, необходимому набору параметров и точности их определения предъявляются различные, часто противоречивые требования. Схема замещения и ее параметры не должны противоречить каталожным данным. Расчеты, проводимые без учета электромагнитных переходных процессов, требуют меньшего числа необходимых параметров, часто ограничиваются нахождением лишь основных индуктивных сопротивлений и не требуют определения электромагнитных постоянных.

Схема замещения асинхронного двигателя приведена на рис. 4.1.

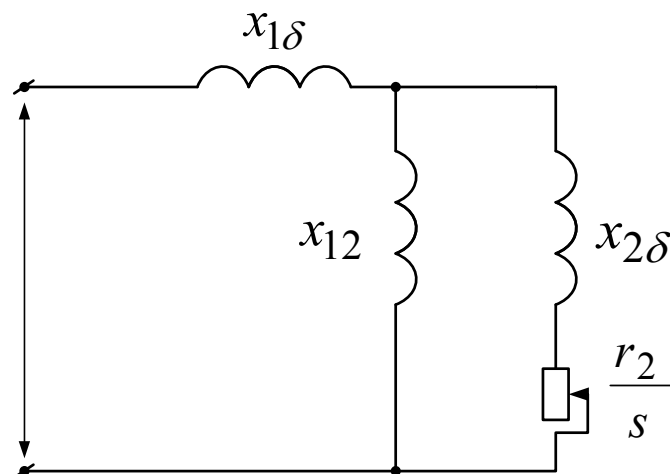


Рисунок 4.1 – Схема замещения асинхронного двигателя

Минимальным набором исходных данных для определения всех необходимых параметров асинхронного электродвигателя являются [1]:  $P_n; \eta; s_n; \cos \varphi_n; m_n; m_m$ .

$P_n$  – номинальная мощность на валу двигателя, (кВт);

$\eta_n$  – к.п.д. при номинальной нагрузке и параметрах;

$s_H$  – номинальное скольжение;

$\cos \varphi_H$  – номинальный коэффициент мощности;

$m_n$  – кратность асинхронного пускового момента в долях номинального момента, определяемого по активной номинальной мощности;

$m_M$  – кратность максимального момента в долях номинального определяемого по активной номинальной мощности.

Согласованные со схемой замещения параметры и электромагнитные постоянные, необходимые для расчета самозапуска, могут быть определены в следующей последовательности:

– рассчитывается постоянная времени двигателя в номинальном режиме при короткозамкнутой статорной обмотке:

$$T'_{1H} = \frac{m_M \eta - \sqrt{(m_M \eta)^2 - 1}}{S_H}; \quad (4.1)$$

– находятся синхронное индуктивное сопротивление двигателя (сопротивление на холостом ходу):

$$x_0 = \frac{1}{\sin \varphi_H - \cos \varphi_H (T'_{1H} S_H)}; \quad (4.2)$$

и сверхпереходное сопротивление

$$x'' = \frac{1}{\sin \varphi_H + \cos \varphi_H (m_M \eta - \sqrt{(m_M \eta)^2 - 1})}. \quad (4.3)$$

Характеристики асинхронного момента при номинальном напряжении и момента сопротивления механизма от скольжения могут быть построены при помощи формул (3.4) и (3.13).

Пример расчета параметров и характеристик электродвигателей приведен ниже. Все численные расчеты в дальнейшем будут приведены для следующих исходных данных:

1. Воздушная линия:  $l = 20$  км.  $U_H = 110$  кВ;  $x_{y\partial} = 0,4$  Ом/км;  $r_{y\partial} = 0,12$  Ом/км.
2. Кабельная линия:  $l = 1,5$  км.  $U_H = 6$  кВ;  $x_{y\partial} = 0,071$  Ом/км;  $r_{y\partial} = 0,129$  Ом/км.
3. Трансформатор Т1: ТРДН 40000/110/6,  $U_{BH} = 115$  кВ,  $U_{HH} = 6,3$  кВ,  $U_{K\%} = 10,5\%$ ,  $\Delta P_K = 175$  кВт;
4. Реактор: РБ-10-2500-0,14  $x_p = 0,12$  Ом.
5. Нагрузка:  $S_H = 10$  МВ·А,  $\cos \varphi_H = 0,85$ ,
6. Параметры механизмов:  
Д1:  $\gamma = 2; m_{mp} = 0,1; k_3 = 1; J = 20$  кг·м<sup>2</sup>.  
Д2:  $\gamma = 2; m_{mp} = 0,2; k_3 = 1; J = 20$  кг·м<sup>2</sup>.  
Д3:  $\gamma = 2; m_{mp} = 0,4; k_3 = 1; J = 20$  кг·м<sup>2</sup>.
7. Асинхронные двигатели: 4А3М-2500 УХЛ4;



$$P_{\text{ном}} = 2500 \text{ кВт}, \quad J_{\text{об}} = 24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad U_H = 6 \text{ кВ}, \quad n_{\text{ном}} = 2973 \frac{\text{об}}{\text{мин}}, \quad s_{\text{ном}} = 0,009, \\ \eta = 97\%, \quad \cos\varphi = 0,89;$$

пусковые параметры:

$$\frac{M_{\text{II}}}{M_H} = 0,85 = m_n; \quad \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} = 2 = m_m; \quad \frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{ном}}} = 0,65; \quad \frac{I_{\text{II}}}{I_{\text{ном}}} = 5,0;$$

8. Время перерыва электроснабжения  $t_{\text{выбег}} = 2 \text{ с}$ ;

### Пример 1. Расчет сопротивлений электродвигателей

1. Согласно формуле (4.1) производится расчет электромагнитной постоянной времени в номинальном режиме:

$$T'_{1H} = \frac{2 \cdot 0,97 - \sqrt{(2 \cdot 0,97)^2 - 1}}{0,009} = 30,844.$$

2. По формулам (4.2, 4.3) находятся синхронное индуктивное сопротивление (на холостом ходу) и сверхпереходное сопротивление двигателя:

$$x_0 = \frac{1}{0,456 - 0,89 \cdot (30,844 \cdot 0,009)} = 4,786,$$

$$x'' = \frac{1}{0,456 + 0,89 \cdot \left( 2 \cdot 0,97 + \sqrt{(2 \cdot 0,97)^2 - 1} \right)} = 0,273.$$

3. Определяется зависимость индуктивного сопротивления от скольжения по формуле (3.2):

$$x(s) = \frac{x_0}{1 + \frac{x_0 - x''}{x''} s^{\frac{1}{\ln s_{\text{кр}}}}},$$

4. Зависимость активного сопротивления от скольжения:

$$r(s) = \frac{0,008}{s}.$$

5. Зависимость полного сопротивления от скольжения:

$$z(s) = \sqrt{x(s)^2 + r(s)^2}.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 4.1. Характеристики зависимостей составляющих и полного сопротивления ЭД от скольжения даны на рис. 4.2.

Таблица 4.1 – Результаты расчетов сопротивлений двигателей

$s$	0,0336	0,04	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1
$x$	0,676	0,647	0,611	0,51	0,424	0,38	0,35	0,315	0,29	0,273
$r$	0,238	0,2	0,16	0,08	0,04	0,027	0,2	0,013	0,01	0,008
$z$	0,717	0,677	0,63	0,516	0,426	0,381	0,351	0,315	0,29	0,273

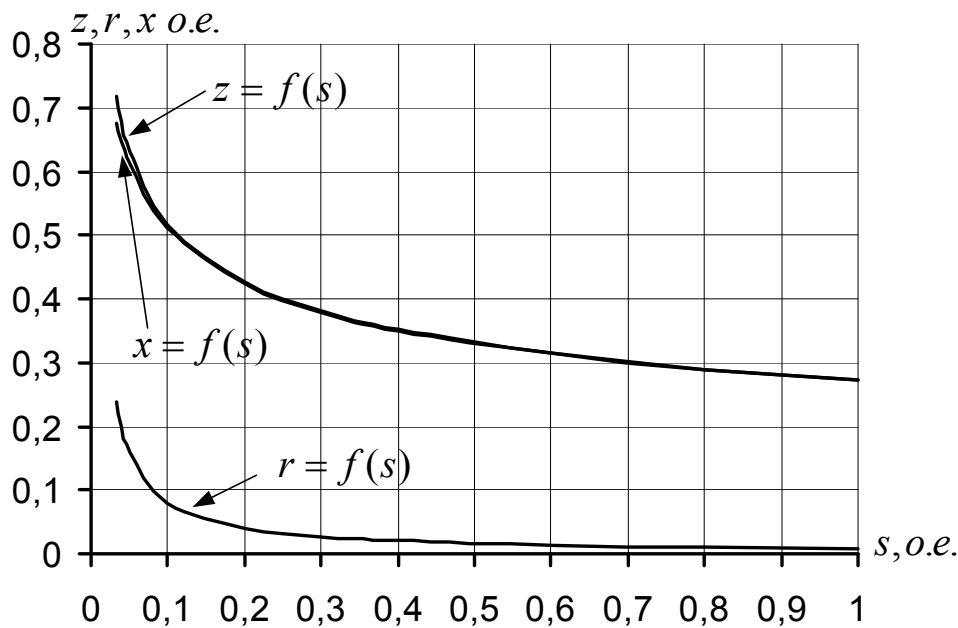


Рисунок 4.2 – Зависимости  $x = f(s)$ ,  $r = f(s)$ ,  $z = f(s)$

### Пример 2. Расчет характеристик электродвигателей

Характеристика асинхронного момента от скольжения при номинальном напряжении строится при помощи формулы (3.4). Критическое скольжение двигателя, соответствующее максимальному асинхронному моменту (формула (3.5)) и коэффициент  $q$  (формула (3.6)) равны:

$$s_{кр} = 0,009 \left( 2 + \sqrt{2^2 - 1} \right) = 0,0336;$$

$$q = \frac{\left( 0,0336 + \frac{1}{0,0336} \right) \frac{0,85}{2} - 2}{1 - \frac{0,85}{2}} = 18,545;$$

При  $s=1$ :  $m_a = \frac{(2 + 18,545) \cdot 2}{\frac{1}{0,0336} + \frac{0,0336}{1} + 18,545} = 0,85$  равен кратности пускового

момента. Результаты расчета сведены в табл. 4.1 и представлены на рис.4.3–4.5. На рис. 4.3–4.5 также даны характеристики моментов сопротивления и электромагнитного момента при разгоне электродвигателей при пониженном напряжении (раздел 6).

Определение значений момента сопротивления механизма в зависимости от скольжения находится по формуле (3.4):

Для АД1:  $m_c = 0,1 + (1 - 0,1)(1 - s)^2$ .

Для АД2:  $m_c = 0,2 + (1 - 0,2)(1 - s)^2$ .

Для АД3:  $m_c = 0,4 + (1 - 0,4)(1 - s)^2$ .

Таблица 4.2 – Характеристики моментов электродвигателей.

$s$	0,0336	0,04	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1
$m_a$	2	1,997	1,98	1,88	1,666	1,49	1,346	1,127	0,97	0,85
Двигатель 1										
$m_c$	0,941	0,929	0,912	0,829	0,676	0,541	0,424	0,244	0,136	0,1
Двигатель 2										
$m_c$	0,947	0,937	0,922	0,848	0,712	0,592	0,488	0,328	0,232	0,2
Двигатель 3										
$m_c$	0,96	0,953	0,942	0,886	0,784	0,694	0,616	0,496	0,424	0,4

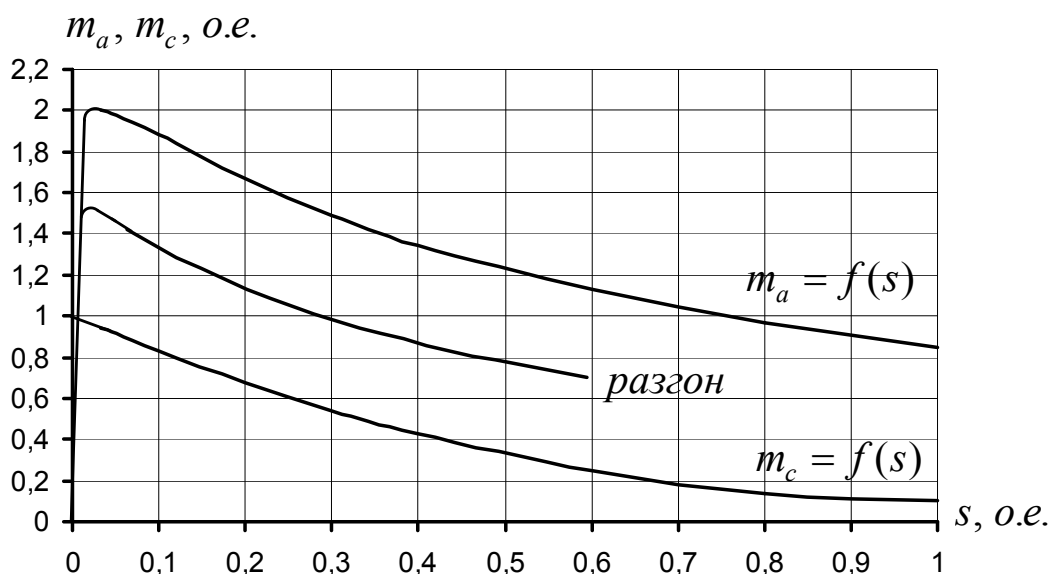


Рисунок 4.3 – Зависимости  $m_a = f(s)$ ,  $m_c = f(s)$ , разгон для АД1

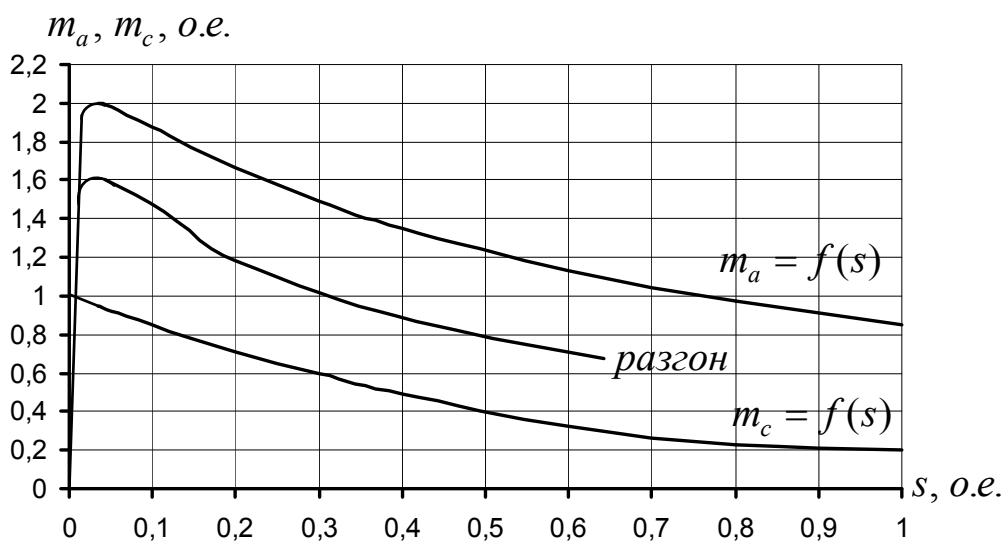


Рисунок 4.4 – Зависимости  $m_a = f(s)$ ,  $m_c = f(s)$ , разгон для АД2

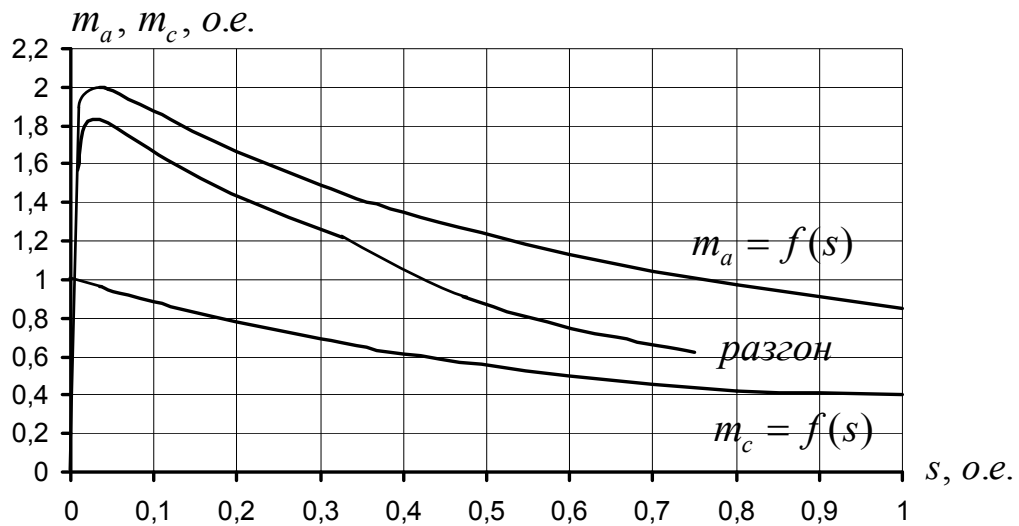


Рисунок 4.5 – Зависимости  $m_a = f(s)$ ,  $m_c = f(s)$ , разгон для АДЗ

## 4.2 Расчет выбега электродвигателей

*Индивидуальный выбег* при наличии близкого КЗ, что имеет место для расчетного случая, происходит по более крутой характеристике, чем при свободном выбеге так как двигатель переходит в генераторный режим. В асинхронном двигателе, вследствие быстрого затухания эдс, тормозной момент практически не вызывает дополнительного торможения и в расчетах, как правило, не учитываются.

Таким образом, расчет индивидуального выбега без учета электромагнитных переходных процессов связан с решением дифференциального уравнения движения, которое может быть записано в виде:

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = m_c; \quad (4.4)$$

$$\text{или } T_j \frac{ds}{dt} = m_c. \quad (4.5)$$

Ввиду гладкости функции  $m_c$  для решения уравнения (4.14) могут быть использованы простые методы численного интегрирования дифференциальных уравнений, например, метод Эйлера [5]. Конечной целью расчета выбега является построение кривых выбега и нахождение скорости электродвигателей к моменту восстановления питания.

При  $m_c = const$  можно получить кривую выбега в виде:

$$\omega = \omega_{нач} - \frac{m_c}{T_j} t, \quad (4.6)$$

где  $\omega_{нач}$  - начальная частота вращения.

Практически, если время перерыва питания или КЗ меньше  $T_j$  в пять и более раз, можно пользоваться формулой (4.6) независимо от характера момента сопротивления механизма.

При численном решении методом Эйлера алгоритм решения строится на последовательности временных интервалов  $\Delta t$ . Так при решении уравнения (4.5) находится приращение скольжения  $\Delta s_i$  на каждом интервале:

$$\Delta s_i = \frac{m_{ci}}{T_j} \Delta t, \quad (4.7)$$

где  $m_{ci}$  находится по формуле (3.13) и скольжение в начале следующего интервала  $s_{i+1}$  находится как:

$$s_{i+1} = s_i + \Delta s_i. \quad (4.8)$$

Алгоритм расчета индивидуального выбега представлен в примере 3.

При *групповом выбеге* расчет зависимости частоты вращения от времени без учета электромагнитных переходных процессов может быть получен эквивалентированием двигательной нагрузки, основанной на двух допущениях:

- алгебраическая сумма мощностей, перераспределяемых между отдельными двигателями при их групповом выбеге равна нулю;
- скорость изменения частоты вращения всех двигателей одинакова.

С учетом этих допущений синхронная частота вращения на секции в процессе выбега определяется как средневзвешенная скорость [1]:

$$\omega_{(t)} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ji} P_{ni} \omega_{i(t)}}{\sum_{i=1}^n T_{ji} P_{ni}}, \quad (4.9)$$

где  $\omega_{i(t)}$  - частота вращения  $i$ -го двигателя в момент времени  $t$  при индивидуальном выбеге;  $n$  - число двигателей, участвующих в групповом выбеге.

Использование формулы (4.9) предполагает расчет индивидуального выбега по изложенным ранее алгоритмам и последующее эквивалентирование их для заданного времени перерыва электроснабжения или работы на удаленное КЗ. Рассмотрение группового выбега при работе на КЗ имеет смысл только при достаточно большом внешнем сопротивлении. При КЗ на питающей секции шин точка КЗ разделяет двигатели, и выбег становится индивидуальным.

Погрешность расчета по выражению (4.9) возрастает с увеличением разброса постоянных инерции  $T_j$ .

В том случае, когда выбегают электродвигатели с одинаковым характером механических характеристик, можно свести задачу к решению одного уравнения движения с эквивалентной постоянной инерции:

$$T_{j\partial} = \frac{\sum_{i=0}^n J_n \omega_{0i}^2}{\sum_{i=1}^n P_{ni}}. \quad (4.10)$$

Решение уравнения движения проводится при этом для характерного двигателя группы.

Следует отметить приближенность рассмотренных, алгоритмов группового выбега. Более точно можно решить эту задачу лишь с учетом электромагнитных переходных процессов, где вопросы обмена энергией решаются автоматически.

### Пример 3. Расчет индивидуального выбега электродвигателей

В рассматриваемом случае, как было сказано ранее, рассчитывается индивидуальный выбег, потому что внешнее КЗ произошло вблизи шин. Во время выбега асинхронные двигатели не оказывают существенного влияния друг на друга и не обмениваются мощностью.

1. Угловая скорость электродвигателя формула (3.16):

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 2973}{60} = 311,3 \text{ с}^{-1}.$$

2. Приведенный момент инерции формула (3.14):

$$J_{np} = J_{\partialв} + J_{мех} = 24 + 20 = 44 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

3. Электромеханическая постоянная времени формула (3.15):

$$T_{jn} = 44 \cdot \frac{311,3^2}{2,5 \cdot 10^6} = 1,706 \text{ с}.$$

4. Расчет индивидуального выбега электродвигателей без учета электромагнитных переходных процессов производится на основе решения дифференциального уравнения  $T_j \frac{ds}{dt} = m_c$  методом Эйлера.

Приращение скольжения  $\Delta s_i$  на каждом интервале:

$$\Delta s_i = \frac{m_c}{T_j} \Delta t,$$

скольжение в начале следующего интервала  $s_{i+1}$  находится как:

$$s_{i+1} = s_i + \Delta s_i.$$

В расчете выбега интервал времени принимаем равным  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ,  $s_{ном} = s_0 = 0,009$ .

Исходные данные для расчета выбега двигателя приведены выше. Результаты расчета сведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты расчетов выбега электродвигателей

$t + \Delta t$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Двигатель 1										
$s$	0,067	0,1185	0,1654	0,208	0,247	0,2827	0,3157	0,3463	0,3747	0,401
$t$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
$s_{i+1}$	0,426	0,449	0,471	0,492	0,511	0,5295	0,547	0,564	0,58	0,595
Двигатель 2										
$s$	0,067	0,1195	0,1675	0,212	0,253	0,291	0,326	0,359	0,39	0,419
$t$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
$s_{i+1}$	0,4465	0,473	0,497	0,522	0,543	0,565	0,5856	0,6054	0,6244	0,6424
Двигатель 3										
$s$	0,067	0,121	0,1716	0,2192	0,2641	0,3065	0,347	0,3853	0,422	0,457
$t$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
$s_{i+1}$	0,491	0,523	0,555	0,585	0,6145	0,643	0,671	0,698	0,7246	0,751

Кривые выбега двигателей построены на рис.4.6.

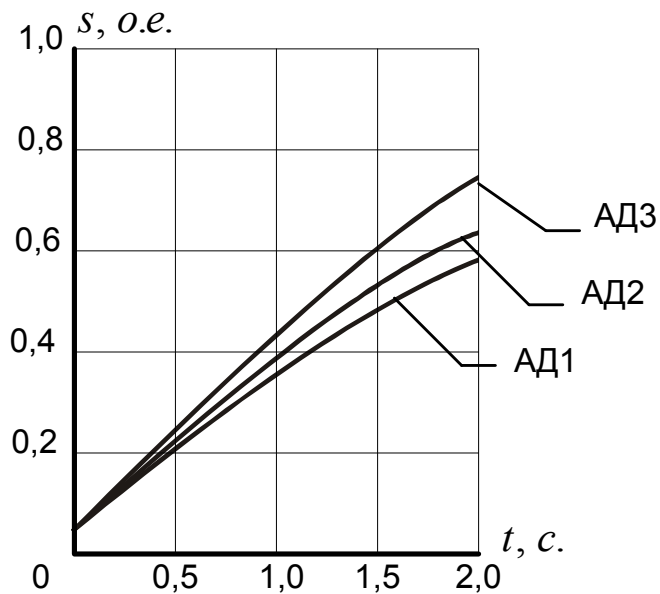


Рисунок 4.6 – Кривые выбега двигателей

## 5 ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ САМОЗАПУСКА

### 5.1 Определение параметров схемы замещения

Определение величин тока включения, остаточного напряжения и момента электродвигателя при самозапуске требуется производить на основании схем замещения. Характерная схема замещения питания узла нагрузки, при которой осуществляется самозапуск, представлена на рис. 5.1.

При проверке самозапуска электродвигателей напряжением 6-10 кВ активными сопротивлениями элементов сети (за исключением линий 6-10 кВ) можно пренебречь и учитывать только реактивные сопротивления. Как правило, самозапуск двигателей осуществляется от источника питания, мощность которого во много раз больше мощности двигателей.

При расчётах в относительных единицах за базисные величины удобно принимать номинальные мощность и напряжение двигателя или группы двигателей. Сопротивления элементов схемы электроснабжения и двигателей при расчетах в относительных единицах приведенных к базисным условиям определяются по следующие формулам [8,9]:

– для воздушных и кабельных линий:

$$x_l = x_{y\partial} l \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_H^2}, \quad (5.1)$$

$$r_l = r_{y\partial} l \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_H^2}, \quad (5.2)$$

где  $U_H$  - среднее номинальное напряжение рассматриваемых линий;

– для реактора:

$$x_p = x_{p(Ом)} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_H^2}, \quad (5.3)$$

– для двигателя:

$$x_{\partial} = x_{\partial(н)} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_H}, \quad (5.4)$$

где  $x_{\partial(н)}$  относительное сопротивление двигателя при номинальных условиях;

– для трансформатора:

$$x_T = \frac{U_K \%}{100} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_H} \left( \frac{U_H}{U_{\bar{\sigma}}} \right)^2, \quad (5.5)$$

$$r_T = \frac{\Delta P}{S_H} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_H}, \quad (5.6)$$

где  $U_K \%$  - напряжение короткого замыкания в процентах;

для трансформатора с расщепленной обмоткой

$$x_B = 0,125x_T, \quad (5.7)$$

$$x_H = 1,75x_T, \quad (5.8)$$



$$r_{Твн} = 2r_{Т}, \quad (5.9)$$

– для нагрузки:

$$x_{наг.} = \frac{S_{\bar{o}}}{S_{н} \sin \varphi_{н}}. \quad (5.10)$$

Схема замещения должна быть преобразована к простейшему виду относительно шин, к которым подключены самозапускающиеся двигатели. При этом источник питания и нагрузка объединяются в один источник с эквивалентной эдс  $E_{\Sigma}$  и сопротивлением  $x_{\Sigma}$  по тем же правилам; что и при расчете токов КЗ [6,8]. Все двигатели, участвующие в самозапуске, объединяются в один с эквивалентным полным сопротивлением:

$$z_{\partial\Sigma} = \sqrt{x_{\partial\Sigma}^2 + r_{\partial\Sigma}^2}. \quad (5.11)$$

#### Пример 4. Расчет параметров схемы замещения

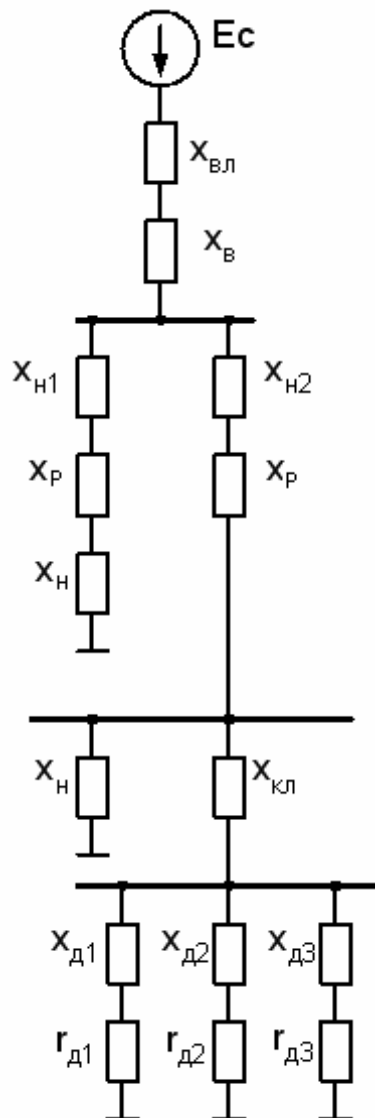


Рисунок 5.1 – Схема замещения

Расчет схемы замещения проводим в относительных единицах приведенных к базисным условиям.

Принимаем базисные величины:  $S_{\bar{\sigma}} = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $U_{\bar{\sigma}} = 6,3 \text{ кВ}$ ,  $E_c = 1,05$ ,

$$I_{\bar{\sigma}} = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{\sqrt{3}U_{\bar{\sigma}}} = 3,665 \text{ кА}.$$

Расчет параметров схемы замещения производим по формулам указанных в главе 5.1 для схемы замещения на рис. 2.4.

$$x_{вкл} = x_{уд} l \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{срн}^2} = 0,4 \cdot 20 \frac{40}{115^2} = 0,02; \quad r_{вкл} = r_{уд} l \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{срн}^2} = 0,12 \cdot 20 \frac{40}{115^2} = 0,007;$$

$$x_T = \frac{U_{\kappa} \% S_{\bar{\sigma}}}{100 S_{HT}} = \frac{10,5 \cdot 40}{100 \cdot 40} = 0,105; \quad x_B = 0,125 x_T = 0,125 \cdot 0,105 = 0,013;$$

$$x_H = 1,75 x_T = 1,75 \cdot 0,105 = 0,184; \quad r_T = \frac{\Delta P_{\kappa} S_{\bar{\sigma}}}{S_H S_H} = \frac{0,175 \cdot 40}{40^2} = 0,0044;$$

$$r_{H1} = r_{H2} = 2r_T = 0,0088; \quad r_B = 0; \quad \sin \varphi_H = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} = \sqrt{1 - 0,85^2} = 0,527;$$

$$x_H = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_H \sin \varphi} = \frac{40}{10 \cdot 0,527} = 7,59; \quad x_{кл} = x_{уд} l \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{срн}^2} = 0,071 \cdot 1,5 \frac{40}{6,3^2} = 0,108;$$

$$r_{кл} = r_{уд} l \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{срн}^2} = 0,129 \cdot 1,5 \cdot \frac{40}{6,3^2} = 0,195; \quad x_p = x_p(OM) \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{нср}^2} = 0,12 \cdot \frac{40}{6,3^2} = 0,121;$$

Так как активное сопротивление всех элементов кроме кабельной линии мало, будет учитываться только активное сопротивление кабельной линии.

Полная мощность двигателя:

$$S_{нд} = \frac{P_H}{\eta_H \cos \varphi_H} = \frac{2500}{0,97 \cdot 0,89} = 2896 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Определение сопротивления двигателей.

Для электродвигателя Д1:

За время выбега  $t_{выбег} = 2 \text{ с.}$ , двигатель АД1 имеет скольжение  $s = 0,595$ .

Воспользуемся упрощенной формулой (3.2) для определения зависимости индуктивного сопротивления двигателя от скольжения.

$$x_{\partial 1(s)} = \frac{x_0}{1 + \frac{x_0 - x''}{x''} s} = \frac{4,786}{1 + \frac{4,786 - 0,273}{0,273} \cdot 0,595} = 0,315.$$

Приведенное к базисным условиям:

$$x_{\partial 1\bar{\sigma}} = x_{\partial 1\bar{\sigma}(s)} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{нд}} = 0,315 \cdot \frac{40}{2,896} = 4,35; \quad r_{\partial 1\bar{\sigma}} = \frac{r_2 S_{\bar{\sigma}}}{s S_{нд}} = \frac{0,008 \cdot 40}{0,595 \cdot 2,896} = 0,186;$$

где  $r_2 = s_H \cos \varphi_H = 0,009 \cdot 0,89 = 0,008$ .

Для электродвигателя Д2:

За время выбега  $t_{\text{выбег}} = 2 \text{ с.}$ , двигатель АД2 имеет скольжение  $s = 0,642$ .

$$x_{\partial 2(s)} = \frac{x_0}{1 + \frac{x_0 - x''}{x''} s^{-\frac{1}{\ln s_{\text{кр}}}}} = \frac{4,786}{1 + \frac{4,786 - 0,273}{0,273} \cdot 0,6424^{-\frac{1}{\ln 0,0336}}} = 0,309.$$

Приведенное к базисным условиям:

$$x_{\partial 2\delta} = x_{\partial 2(s)} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{нд}}} = 0,309 \cdot \frac{40}{2,896} = 4,268; \quad r_{\partial 2\delta} = \frac{r_2 S_{\delta}}{S S_{\text{нд}}} = \frac{0,008 \cdot 40}{0,642 \cdot 2,896} = 0,172.$$

Для электродвигателя Д3:

За время выбега  $t_{\text{выбег}} = 2 \text{ с.}$ , двигатель АД3 имеет скольжение  $s = 0,751$ .

$$x_{\partial 3(s)} = \frac{x_0}{1 + \frac{x_0 - x''}{x''} s^{-\frac{1}{\ln s_{\text{кр}}}}} = \frac{4,786}{1 + \frac{4,786 - 0,273}{0,273} \cdot 0,751^{-\frac{1}{\ln 0,0336}}} = 0,296.$$

Приведенное к базисным условиям:

$$x_{\partial 3\delta} = x_{\partial 3(s)} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{нд}}} = 0,296 \cdot \frac{40}{2,896} = 4,09; \quad r_{\partial 3\delta} = \frac{r_2 \cdot S_{\delta}}{S \cdot S_{\text{нд}}} = \frac{0,008 \cdot 40}{0,751 \cdot 2,896} = 0,147.$$

## 5.2 Определение остаточного напряжения и тока включения двигателей

При определении тока включения двигатель замещается сопротивлением,  $x_{c3}$  которое для асинхронного двигателя находится по формуле:

$$x_{c3} = \frac{x_{x.x}}{1 + \frac{x_{x.x} - x_n}{x_n} \cdot s_{c3}^{-\frac{1}{\ln s_M}}}. \quad (5.12)$$

При такой схеме замещения ток получается равным пусковому или меньше его. Погрешность в определении тока включения не имеет существенного значения, поскольку асинхронные двигатели не требуют расчета тока самозапуска. Отстройку релейной защиты источника питания от токов самозапуска выполняют по суммарному пусковому току двигателя. Учет броска тока при самозапуске, когда наводимая в обмотке статора эдс не успела еще затухнуть, в случае необходимости производится выбором соответствующего коэффициента отстройки.

Формула расчета остаточного напряжения на электродвигателях:

$$U_{\text{ост}} = \frac{E_{\delta}}{1 + \frac{z_c}{z_{\delta.\delta}}}, \quad (5.13)$$

где  $z_c$  - полное сопротивление системы от источника питания до двигателя с учетом промежуточной нагрузки;

$z_{\partial.э}$  - эквивалентное суммарное сопротивление двигателей.

Если самозапуск происходит от предварительно нагруженного трансформатора, то при определении тока необходимо учитывать влияние мощных предвключенных нормально работающих двигателей. Эти двигатели в начальный момент восстановления питания следует рассматривать как дополнительные источники питания. Для начального момента самозапуска они вводятся в схему замещения своими эдс и пусковыми сопротивлениями. В настоящем пособии этот вопрос не рассматривается.

Ток включения двигателя

$$I_{вкл} = \frac{E_{э}}{x_c + z_{\partial.э}}. \quad (5.14)$$

### Пример 5. Определение остаточного напряжения и тока включения

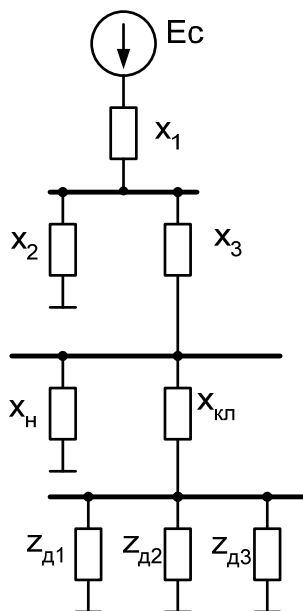


Рисунок 5.2 - Схема замещения.

Для определения остаточного напряжения и тока включения необходимо, свернуть схему замещения рис. 5.1 относительно шин запускающихся двигателей. Первый этап преобразований приведен на рис. 5.2

$$z_{\partial 1} = \sqrt{x_{\partial 1}^2 + r_{\partial 1}^2} = \sqrt{4,35^2 + 0,186^2} = 4,354;$$

$$z_{\partial 2} = \sqrt{x_{\partial 2}^2 + r_{\partial 2}^2} = \sqrt{4,268^2 + 0,172^2} = 4,27;$$

$$z_{\partial 3} = \sqrt{x_{\partial 3}^2 + r_{\partial 3}^2} = \sqrt{4,09^2 + 0,147^2} = 4,093;$$

$$x_1 = x_{вл} + x_{б} = 0,02 + 0,013 = 0,033$$

$$x_2 = x_{н1} + x_p + x_{наг} = 0,184 + 0,121 + 7,59 = 7,895;$$

$$x_3 = x_{н2} + x_p = 0,184 + 0,121 = 0,305;$$

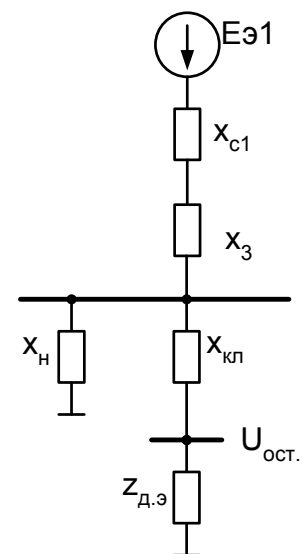


Рисунок 5.3 - Схема замещения.

$$\frac{1}{z_{\partial э}} = \frac{1}{z_{\partial 1}} + \frac{1}{z_{\partial 2}} + \frac{1}{z_{\partial 3}} = \frac{1}{4,354} + \frac{1}{4,27} + \frac{1}{4,093} = 0,708;$$

$$z_{\partial э} = \frac{1}{0,708} = 1,412;$$

Для схемы рис 5.3

$$E_{э1} = \frac{E_c \frac{1}{x_1}}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2}} = \frac{1,05 \cdot \frac{1}{0,033}}{\frac{1}{0,033} + \frac{1}{7,895}} = 1,045;$$

$$x_{c1} = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} = \frac{0,033 \cdot 7,895}{0,033 + 7,895} = 0,033;$$

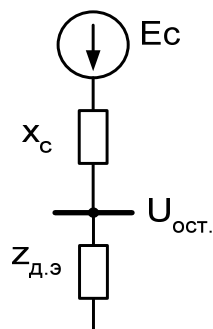


Рисунок 5.4 - Схема замещения.

Для результирующей схемы замещения рис. 5.4

$$x_c = \frac{(x_{c1} + x_3)x_H}{x_{c1} + x_3 + x_H} + x_{кл} = \frac{(0,033 + 0,305) \cdot 7,59}{0,033 + 0,305 + 7,59} + 0,108 = 0,432$$

$$E_9 = \frac{E_{91} \frac{1}{x_{c1} + x_3}}{\frac{1}{x_{c1} + x_3} + \frac{1}{x_H}} = \frac{1,045 \cdot \frac{1}{0,033 + 0,305}}{\frac{1}{0,033 + 0,305} + \frac{1}{7,59}} = 1,00.$$

Полное сопротивление системы

$$z_c = \sqrt{x_c^2 + r_{кл}^2} = \sqrt{0,432^2 + 0,195^2} = 0,474$$

Остаточное напряжение рассчитывается по формуле (5.13):

$$U_{ост} = \frac{E_9}{1 + \frac{z_c}{z_{д.э}}} = \frac{1}{1 + \frac{0,474}{1,412}} = 0,75.$$

Ток включения двигателя формула (5.14):

$$I_{вкл*} = \frac{E_9}{z_c + z_{д.э}} = \frac{1}{0,474 + 1,412} = 0,53;$$

$$I_{вкл} = I_{вкл*} I_{\sigma} = 0,53 \cdot 3,665 = 1,94 \text{ кА.}$$

### 5.3 Определение избыточного момента при самозапуске

Оценка возможности самозапуска двигателей сводится к сравнению развиваемого двигателем электромагнитного момента ( $M_{эсэ}$ ) с механическим моментом сопротивления ( $M_{сэс}$ ) при восстановлении электроснабжения по выражению (3.1). До начала расчета разгона электродвигателей при восстановлении питания необходимо проверить условия избыточности электромагнитного момента каждого двигателя (выражение 3.1).

#### Пример 6. Оценка возможности самозапуска

Расчет электромагнитного момента при самозапуске.

Для двигателя Д1:

Находится электромагнитный асинхронный момента АД от скольжения при изменяющемся напряжении формула (3.3):

$$m_{a \partial 1} = \frac{(2 + q)m_{\max} U_{\partial}^2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + q} = \frac{(2 + 18,545) \cdot 2 \cdot 0,75^2}{\frac{0,595}{0,0336} + \frac{0,0336}{0,595} + 18,545} = 0,639.$$

Для двигателя Д2:

$$m_{a \partial 2} = \frac{(2 + 18,545) \cdot 2 \cdot 0,75^2}{\frac{0,642}{0,0336} + \frac{0,0336}{0,642} + 18,545} = 0,615.$$

Для двигателя Д3:

$$m_{a \partial 3} = \frac{(2 + 18,545) \cdot 2 \cdot 0,75^2}{\frac{0,751}{0,0336} + \frac{0,0336}{0,751} + 18,545} = 0,567.$$

2. Момент сопротивления механизма находится по формуле (3.13).

Для двигателя Д1:

$$m_{ссз} = m_{mp} + (k_3 - m_{mp})(1 - s)^{\gamma} = 0,1 + (1 - 0,1) \cdot (1 - 0,595)^2 = 0,248;$$

0,639 больше чем  $1 \cdot 1 \cdot 0,248 = 0,273$  – условие (3.1) самозапуска выполняется.

Для двигателя Д2:

$$m_{ссз} = 0,1 + (1 - 0,2)(1 - 0,6424)^2 = 0,303;$$

0,615 > 0,33 – условие (3.1) самозапуска выполняется.

Для двигателя Д3:

$$m_{ссз} = 0,1 + (1 - 0,4)(1 - 0,751)^2 = 0,437;$$

0,567 > 0,48 – условие (3.1) самозапуска выполняется.

Таким образом, при восстановлении питания через 2 с самозапуск электродвигателей возможен.

## 6 РАСЧЕТ РАЗГОНА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Процесс разгона после восстановления питания анализируется с помощью уравнения движения (3.9)

$$T_j \frac{ds}{dt} = m_c - m_a = -\Delta m,$$

где  $\Delta m$  – избыточный момент на валу двигателя.

Время самозапуска может, быть определено интегрированием уравнения (3.9) методом Эйлера, который основан на замене уравнения движения соотношением

$$T_j \frac{\Delta s_i}{\Delta t_i} = -\Delta m_i, \quad (6.1)$$

где  $\Delta s_i, \Delta t_i$  – конечные приращения скольжения и времени;

$\Delta m_i$  – значение избыточного момента в рассматриваемом интервале частоты вращения.

Расчет процесса разгона электродвигателей с момента восстановления питания связан с решением системы дифференциальных уравнений, является принципиально групповым и производится в следующей последовательности [3]:

1. Определяются индуктивные сопротивления трансформатора и других элементов, расположенных между источником питания и сборными шинами, к которым подключены рассматриваемые двигатели, а так же находятся сопротивления двигателей в зависимости от скольжения, приведенные к базисным условиям (смотри разделы 5.1, 5.2).

2. Определяется эквивалентное сопротивление двигателей, участвующих в самозапуске при  $s = s_{c3}$  (смотри раздел 5.2):

$$\frac{1}{z_{\partial\partial}} = \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \dots + \frac{1}{z_{n+1}} . \quad (6.2)$$

3. Находится напряжение двигателей в момент подачи питания, т.е. в момент начала самозапуска (смотри раздел 5.2):

$$U_{\partial} = \frac{E_{c3}}{1 + \frac{z_{c.3}}{z_{\partial.3}}} . \quad (6.3)$$

4. Рассчитываются вращающий момент и момент сопротивления каждого двигателя, участвующего в самозапуске при этом можно использовать формулы (3.3, 3.13).

5. Определяется избыточный момент на валу каждого двигателя:

$$\Delta m = m_a - m_c . \quad (6.4)$$

Быстрее всех запустится двигатель, у которого больше отношение  $\frac{\Delta m}{T_j}$ .

6. Находится приращение скольжения  $\Delta s_i$  на интервале  $\Delta t$ :

$$\Delta s_i = \frac{\Delta m_i}{T_j} \Delta t . \quad (6.5)$$

Скольжение в начале следующего интервала времени будет определяться так:

$$s_{i+1} = s_i - \Delta s_i . \quad (6.6)$$

На каждом последующем интервале времени процесс повторяется начиная с пункта 2 при новом значении скольжения. При этом напряжение на шинах электродвигателей повышается, что облегчает самозапуск.

По достижению одним из двигателей номинального скольжения двигатель вводится в расчет своим  $z_{\partial n}$ . Если избыточный момент на валу одного или нескольких двигателей получается отрицательным, то самозапуск оказывается или затянутым, или невозможным вообще. В этом случае необходимо выяснить условия, при которых самозапуск будет обеспечен. То есть необходимо решить вопрос о возможности уменьшения времени перерыва питания, целесообразности отключения части электродвигателей или их разгрузки и снова рассчитать процесс самозапуска. Расчет заканчивается при достижении всеми двигателями установившегося значения скольжения.

Полное время самозапуска двигателей определяют как сумму отдельных интервалов времени.

Блок-схема программы расчета разгона асинхронного двигателя приведена на рис. 6.1

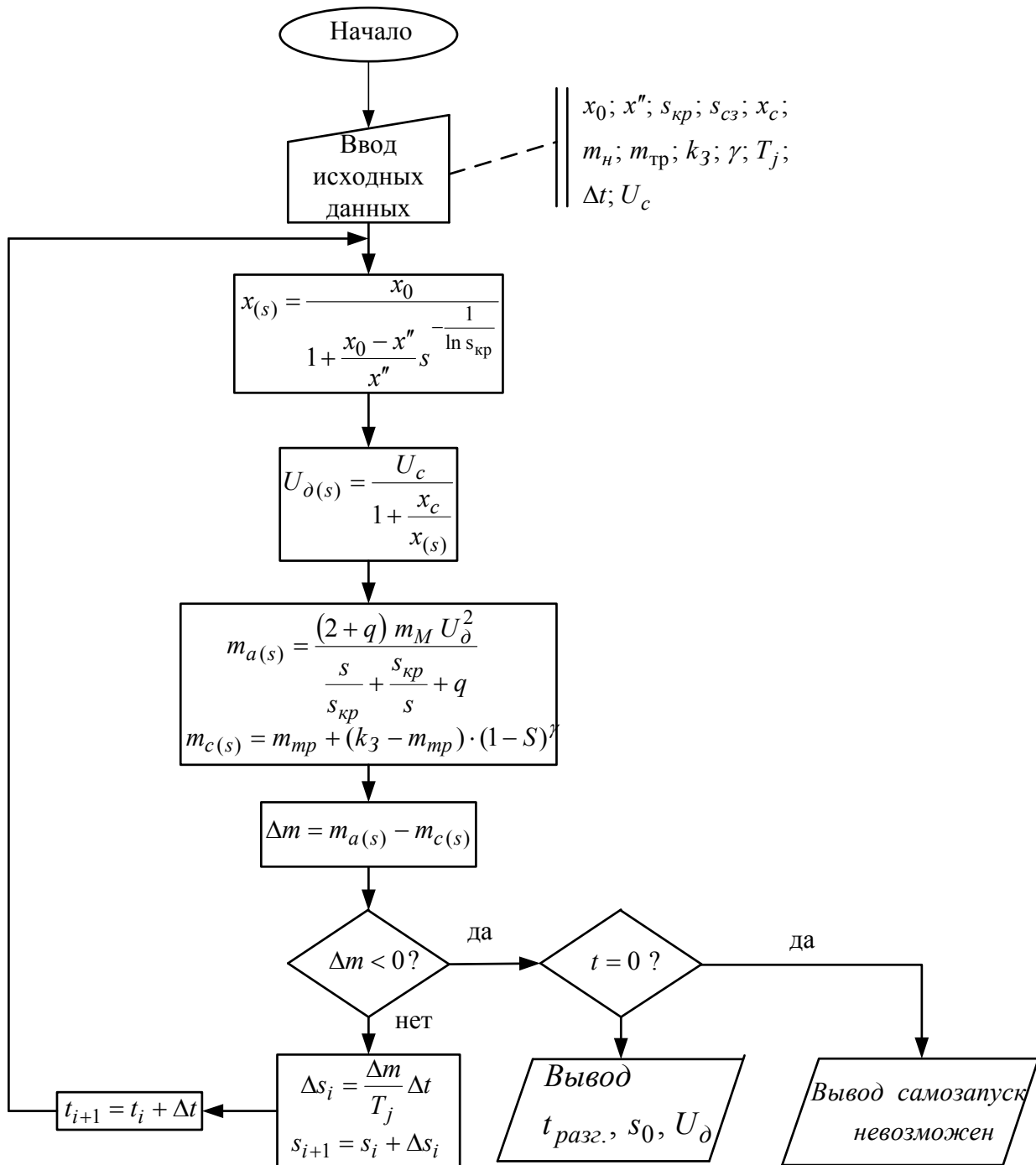


Рисунок 6.1 – Блок-схема программы расчета разгона асинхронного двигателя

Для пояснения изложенного рассмотрим пример расчета разгона электродвигателей.



## Пример 7. Расчет разгона электродвигателей

Алгоритм расчета разгона электродвигателей представлен выше. Эквивалентное сопротивление системы  $z_c = 0,474$ , её эквивалентная эдс  $E_э = 1,00$ , а также эквивалентное сопротивление электродвигателей  $z_{дэ} = 1,412$  и остаточное напряжение в начале самозапуска  $U_{ост} = 0,75$  было определено ранее в разделе 5.

Избыточный момент первого двигателя на первом шаге

$$\Delta m_{д.1} = m_{а.д.1} - m_{с.д.1} = 0,639 - 0,248 = 0,391.$$

Приращение скольжения первого двигателя на первом шаге  $\Delta s_i$  при интервале  $\Delta t = 0,2$  с

$$\Delta s_{д.1} = \frac{\Delta m_{д.1}}{T_j} \Delta t = \frac{0,391}{1,706} \cdot 0,2 = 0,046.$$

Скольжение в начале следующего интервала времени

$$s_{i+1} = s_{д.1} - \Delta s_{д.1} = 0,595 - 0,046 = 0,541.$$

Аналогично производится расчет для двух других двигателей, определяются их скольжение и напряжение на шинах в начале следующего шага. Результаты численного расчета сведены в табл. 6.1. В табл. 6.1 результаты расчета приведены через один шаг.

При достижения всеми двигателями номинального момента расчет прекращается. По результатам расчета строятся характеристики зависимостей  $s(t), U_{д}(t), m_{сзн}(t)$ .

По результатам расчетов видно, что время разгона двигателей соответственно составляет  $t_{разг1} = 2,6$  с,  $t_{разг2} = 3,2$  с,  $t_{разг3} = 4,6$  с.

Характеристики  $m_a$  при самозапуске представлены на рисунках (4.3-4.5).

Результаты расчета изменения напряжения на шинах  $U_{д}(t)$  даны на рис. 6.2.

Таблица 6.1 – Результаты расчета разгона асинхронных двигателей

$t + \Delta t$	$S_i$	$x_i$	$r_i$	$z_i$	$z_{ci}$	$U_{\partial i}$	$m_{ai}$	$m_{ci}$	$\Delta m_i$	$\Delta s_i$
0	0,595	4,354	0,186	4,358	1,411	0,751	0,639	0,248	0,391	0,046
	0,642	4,263	0,172	4,267			0,615	0,303	0,313	0,037
	0,751	4,083	0,147	4,085			0,567	0,437	0,129	0,015
0,2	0,549	4,451	0,201	4,455	1,432	0,754	0,668	0,283	0,386	0,045
	0,605	4,333	0,183	4,337			0,638	0,325	0,313	0,037
	0,736	4,106	0,150	4,108			0,577	0,442	0,135	0,016
0,6	0,460	4,674	0,240	4,680	1,478	0,760	0,735	0,363	0,372	0,044
	0,532	4,490	0,208	4,495			0,689	0,375	0,314	0,037
	0,703	4,157	0,157	4,160			0,600	0,453	0,148	0,017
1	0,373	4,948	0,296	4,957	1,533	0,767	0,812	0,454	0,358	0,042
	0,458	4,678	0,241	4,684			0,748	0,435	0,314	0,037
	0,668	4,217	0,165	4,220			0,627	0,466	0,161	0,019
1,4	0,290	5,300	0,381	5,314	1,601	0,774	0,902	0,554	0,349	0,041
	0,385	4,907	0,287	4,916			0,819	0,503	0,316	0,037
	0,629	4,287	0,176	4,290			0,660	0,482	0,177	0,021
1,8	0,208	5,795	0,530	5,819	1,689	0,783	1,012	0,664	0,348	0,041
	0,310	5,203	0,356	5,215			0,904	0,581	0,324	0,038
	0,587	4,371	0,188	4,375			0,699	0,502	0,197	0,023
2,2	0,126	6,629	0,877	6,687	1,818	0,796	1,153	0,788	0,365	0,043
	0,233	5,620	0,473	5,640			1,014	0,670	0,344	0,040
	0,539	4,473	0,205	4,478			0,751	0,527	0,223	0,026
2,6	0,038	9,045	2,894	9,496	2,087	0,817	1,334	0,933	0,402	0,047
	0,150	6,325	0,735	6,368			1,181	0,778	0,403	0,047
	0,485	4,606	0,228	4,612			0,830	0,559	0,271	0,032
3	0,009	12,913	12,277	17,818	2,656	0,850	1,318	0,984	0,334	0,039
	0,047	8,562	2,335	8,874			1,438	0,926	0,512	0,060
	0,415	4,806	0,266	4,813			0,959	0,605	0,354	0,042
3,4	0,009	12,913	12,277	17,818	3,263	0,875	1,395	0,984	0,411	0,048
	0,009	12,913	12,277	17,818			1,395	0,986	0,409	0,048
	0,325	5,138	0,340	5,149			1,110	0,673	0,437	0,051
3,8	0,009	12,913	12,277	17,818	3,490	0,882	1,418	0,984	0,434	0,051
	0,009	12,913	12,277	17,818			1,418	0,986	0,432	0,051
	0,219	5,716	0,504	5,738			1,267	0,766	0,501	0,059
4,2	0,009	12,913	12,277	17,818	3,988	0,895	1,460	0,984	0,477	0,056
	0,009	12,913	12,277	17,818			1,460	0,986	0,475	0,056
	0,096	7,126	1,153	7,219			1,514	0,891	0,624	0,073
4,6	0,009	12,913	12,277	17,818	5,939	0,927	1,566	0,984	0,583	0,068
	0,009	12,913	12,277	17,818			1,566	0,986	0,581	0,068
	0,009	12,913	12,277	17,818			1,566	0,989	0,577	0,068

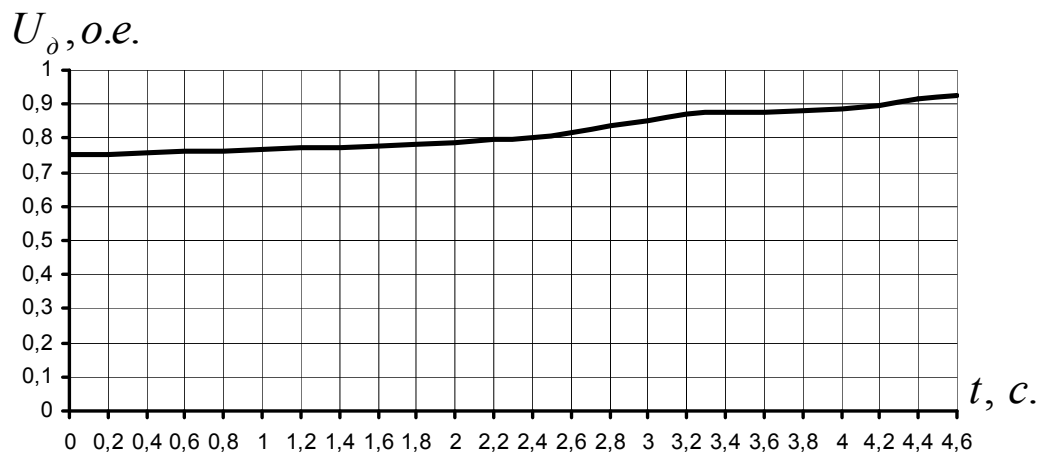


Рисунок 6.2 – Характеристика зависимости  $U_d(t)$

## 7 РАСЧЕТ НАГРЕВА

Для ответственных двигателей, самозапуск или повторный пуск которых должны быть обеспечены сразу же после остановки, т.е. в горячем состоянии, дополнительное максимальное превышение температуры зависит от класса изоляции обмоток и при учебном проектировании может быть принято равным  $135^{\circ}\text{C}$ . Учитывая, что самозапуск происходит относительно редко можно использовать упрощенный расчет [2]. В этом случае формула превышения температуры обмоток выглядит так

$$\Delta T_i = \frac{t_{\text{разг}} j_n^2 (k_{ni}^2 - 1)}{150}, \quad (7.1)$$

где  $j_n$  – номинальная плотность тока в обмотках статора ( $\text{A}/\text{мм}^2$ );

$$k_{ni} = \frac{I_{\text{вкл.}i}}{I_n} \text{ – кратность тока включения при самозапуске.}$$

Более строгие методики расчета нагрева, в том числе и ротора двигателя даны в [2].

### Пример 8. Расчет температуры обмоток двигателей

Для двигателя Д1:

$T_i = 20^{\circ} + \Delta T_i$ , где  $20^{\circ}$  температура окружающей среды.

$$j = 5 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}; \quad k_{ni} = \frac{I_{\text{вкл.}i}}{I_n}; \quad I_{\text{сз.}i*} = \frac{U_{\text{осм}}}{z_{\partial.i}}; \quad I_{\text{вкл.}i} = I_{\text{сз.}i*} \cdot I_{\partial}; \quad t_{\text{разг}} = 2,6\text{c}$$

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_n \eta_n} = \frac{2500}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,89 \cdot 0,97} = 278,7 \text{ A.}$$

$$I_{сз.д1*} = \frac{0,75}{4,354} = 0,172; \quad I_{вкл.д1} = 0,172 \cdot 3,665 = 630 A. \quad k_{n.д1} = \frac{630}{278,7} = 2,26.$$

$$\Delta T_1 = \frac{t_{разг1} j_n^2 (k_{n1}^2 - 1)}{150} = \frac{2,8 \cdot 5^2 \cdot (2,26^2 - 1)}{150} = 1,917; \quad T_1 = 20 + 1,917 = 21,917 \text{ } ^\circ C.$$

Для двигателя Д2:

$$I_{сз.д2*} = \frac{0,75}{4,27} = 0,176; \quad I_{вкл.д2} = 0,176 \cdot 3,665 = 645 A. \quad k_{n.д1} = \frac{645}{278,7} = 2,314.$$

$$\Delta T_1 = \frac{3,2 \cdot 5^2 \cdot (2,314^2 - 1)}{150} = 2,228; \quad T_1 = 20 + 2,228 = 22,228 \text{ } ^\circ C.$$

Для двигателя Д3:

$$I_{сз.д3*} = \frac{0,75}{4,093} = 0,183; \quad I_{вкл.д3} = 0,183 \cdot 3,665 = 670,7 A. \quad k_{n.д1} = \frac{670,7}{278,7} = 2,414.$$

$$\Delta T_1 = \frac{4,6 \cdot 5^2 \cdot (2,414^2 - 1)}{150} = 3,664; \quad T_1 = 20 + 3,664 = 23,664 \text{ } ^\circ C.$$

Вывод: результаты расчетов показали, что разгон всех двигателей заканчивается через 4,6 секунды, причем быстрее разгоняются менее нагруженные двигатели (в данном случае все двигатели одной мощности).

При перерыве питания 2 секунды самозапуск возможен у всех двигателей, без дополнительных мероприятий по снижению величины нагрузки на валу. Нагрев электродвигателей не превышает допустимый.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1985. 136 с.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высш. Школа, 1978. 416 с.
4. Эрнст А.Д. Устойчивость узлов нагрузки: Учеб. пособие / А.Д. Эрнст, К.И. Никитин. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. 48 с.
5. Эрнст А.Д. Численные расчеты самозапуска электродвигателей: Учеб. пособие / А.Д. Эрнст, Б.Н.Коврижин. Омск: Изд-во ОмПИ, 1989. 80 с.
6. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970. 520 с.
7. Мак-Кракен Д. Численные методы и программирование на Фортране / Д. Мак-Кракен, У. Дорн. М.: Мир, 1977. 584 с.
8. Эрнст А.Д. Расчет токов короткого замыкания в системах электроснабжения: Учеб. пособие / А.Д. Эрнст, М.В. Шкаруба. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. 60 с.
9. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие. – Новосибирск: НГТУ, 2003. 283с.

ЗА Д А Н И Е  
к СРС по курсу «Устойчивость узлов нагрузки»  
(Самозапуск электродвигателей)

Шифр \_\_\_\_\_

Выдано студенту \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_

1. Определить параметры электродвигателей и построить их механические характеристики при  $U = U_H$  и характеристики момента сопротивления в диапазоне скольжения ( $0 < s < 1$ ).
2. Произвести расчет и построить характеристики сопротивлений электродвигателей  $x(s)$ ,  $r(s)$ ,  $z(s)$  в зависимости от скольжения. Оценить влияние активного сопротивления.
3. Произвести расчет выбега за время перерыва электроснабжения и построить характеристики выбега электродвигателей.
4. Определить параметры схемы замещения, оценить влияние активного сопротивления, вычислить ток включения, остаточное напряжение и избыточный момент при самозапуске. Оценить возможность самозапуска. Принять в случае невозможности самозапуска необходимые меры для его обеспечения.
5. Произвести численный расчет разгона электродвигателей и построить характеристики  $s(t)$ ,  $U_d(t)$ ,  $m(s)$ . Определить время разгона.
6. Определить превышение температуры обмоток электродвигателей за время разгона.

Срок сдачи \_\_\_\_\_

Задание выдал \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	2
1 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАСЧЕТОВ .....	3
2 СБОРНИК ЗАДАНИЙ.....	4
3 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЖИМА САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.....	11
3.1 Применение самозапуска .....	11
3.2 Краткая характеристика процессов при самозапуске двигателей .....	13
3.3 Уравнения движения при самозапуске .....	19
4 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ВЫБЕГА ЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ .....	22
4.1 Параметры и характеристики асинхронных двигателей .....	22
Пример 1. Расчет сопротивлений электродвигателей .....	24
Пример 2. Расчет характеристик электродвигателей .....	25
4.2 Расчет выбега электродвигателей .....	27
Пример 3. Расчет индивидуального выбега электродвигателей .....	29
5 ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ САМОЗАПУСКА .....	31
5.1 Определение параметров схемы замещения .....	31
Пример 4. Расчет параметров схемы замещения .....	32
5.2 Определение остаточного напряжения и тока включения двигателей .....	34
Пример 5. Определение остаточного напряжения и тока включения .....	35
5.3 Определение избыточного момента при самозапуске .....	36
Пример 6. Оценка возможности самозапуска .....	36
6 РАСЧЕТ РАЗГОНА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ .....	37
Пример 7. Расчет разгона электродвигателей .....	40
7 РАСЧЕТ НАГРЕВА .....	42
Пример 8. Расчет температуры обмоток двигателей .....	42
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	44
Приложение А ЗАДАНИЕ к СРС .....	45