

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.313.3, 621.313-57, 621.311, 621.311.001.57

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-35-42)

Захарова А.А., Комков А.Н.

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГОЛОВНЫХ АГРЕГАТОВ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩЕЙ СТАНЦИИ

В данной статье рассмотрены вопросы, связанные с реализацией группового самозапуска электроприводов головных насосных агрегатов на нефтеперекачивающей станции. Поскольку нефтеперекачивающие станции относятся к объектам повышенной опасности, для них эта проблема стоит особенно остро из-за жестких требований к непрерывности процессов трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Проведено исследование и моделирование самозапуска группы электроприводов смешанного состава в программном комплексе ЕТАР для действующей нефтеперекачивающей станции. Рассмотрена задача обеспечения самозапуска электродвигателей именно большой единичной мощности с целью изучения также их взаимного влияния друг на друга. В результате проведения многократных модельных экспериментов определены значения напряжений статической устойчивости и время динамической устойчивости электротехнической системы предприятия. На основании полученных данных построена граница динамической устойчивости системы, определены оптимальные условия реализации группового самозапуска, соблюдение которых позволяет обеспечить бесперебойную работу нефтеперекачивающих станций при провалах напряжения в системе внешнего электроснабжения. Особое внимание уделено оценке уставок и селективности существующих устройств релейной защиты и автоматики, поскольку только при их корректной отстройке самозапуск позволяет расширить область устойчивой работы электротехнической системы и сохранить электроприводы магистральных насосных агрегатов в работе после нарушений электроснабжения. На основе проведенного анализа предложен вариант исполнения защиты минимального напряжения, учитывающий все особенности осуществления самозапуска электроприводов смешанного состава на рассматриваемой нефтеперекачивающей станции, значительно отличающийся от общепринятого для таких объектов, но позволяющий в полной мере использовать запас устойчивости электротехнической системы. Установлено отсутствие скачкообразного изменения времени динамической устойчивости для электротехнической системы смешанного состава с электроприводами большой единичной мощности при сопоставимых мощностях асинхронной и синхронной двигательной нагрузки. Точка бифуркации на границе динамической устойчивости при этом сохраняется.

Ключевые слова: самозапуск, электротехническая система смешанного состава, нефтеперекачивающая станция, устойчивость, синхронный электродвигатель, асинхронный электродвигатель, защита минимального напряжения, моделирование, автоматический ввод резерва, ПК ЕТАР.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в состав магистрального нефтепровода входят головные сооружения, линейная часть, промежуточные нефтеперекачивающие станции (НПС), конечные пункты и нефтебазы [1, с. 63]. Основная функция промежуточных станций заключается в поддержании давления нефти на линейном участке трубопровода. В случае выхода из строя одной такой станции на остальные «соседние» промежуточные станции нагрузка, соответственно, повышается. Стоит отметить, что данная ситуация носит непредсказуемый характер, поскольку отключение всего одной станции может спровоцировать срабатывание автоматической защиты по давлению на ближайших станциях, что приведет уже к их отключению. Важно подчеркнуть, что такую защиту по давлению устанавливают непосредственно в схеме управления насосными агрегатами, благодаря чему осуществляется контроль давления во всех точках технологической схемы [2, с. 56-57]. В дальнейшем ситуация будет развиваться таким образом, что нагрузка будет продолжать увеличиваться, и возможно последовательное «веерное» отключение большинства промежуточных станций. Безусловно, даже если останутся все промежуточные станции, это не остановит перекачку нефти при нормально функционирующей головной насосной станции, однако неблагоприятные послед-

ствия такой ситуации могут значительно повлиять на сроки поставок плановых объемов нефти. Также необходимо обратить внимание на то, что рост числа гидравлических ударов нефти при таких условиях повлечет за собой образование трещин в стенках трубопровода.

В данной статье рассматривается ситуация, в которой отключение магистрального насосного агрегата вызвано неудачно реализованным самозапуском электроприводов насосов. Поскольку давление нефти на выходе прямо пропорционально квадрату скорости вращения центробежных насосов, участвующих в процессе перекачки нефти, то самозапуск позволяет сохранить насос в работе во время провала напряжения и выйти на рабочий режим после восстановления уровня напряжения. Суть процесса самозапуска состоит в том, что восстановление уровня напряжения приходится на ещё выбегающий двигатель, при этом сохраняется связь с системой электроснабжения. За счет наличия начальной скорости такой двигатель гораздо быстрее разгонится до номинальной скорости, что предпочтительно, учитывая зависимость уровня давления в трубопроводе от скорости вращения ротора [3, с. 5]. Но при этом стоит отметить, что после глубокого провала напряжения время самозапуска из-за взаимного влияния электроприводов может быть ещё больше, чем при пуске. Необходимо также учитывать тот факт, что на НПС в качестве приводов центробежных насосов часто используются электродвигатели смешанного состава большой единичной

мощности. Это связано с эффективностью совместной работы синхронных и асинхронных двигателей, так как синхронные электродвигатели (далее СД) позволяют повысить энергетические показатели. Поэтому при решении задачи реализации самозапуска нужно учитывать вид границы динамической устойчивости двигателей, участвующих в этом процессе. Разнородность электродвигательной нагрузки определяет условия группового самозапуска. Это вызвано тем, что асинхронные двигатели (далее АД) обладают хорошими показателями динамической устойчивости, в отличие от синхронных, которые не выдерживают глубоких провалов напряжения и сразу же выпадают из синхронизма. С другой стороны, АД уступают СД при незначительных, но длительных провалах напряжения, из-за квадратичной зависимости электромагнитного момента от напряжения. Кроме того, при групповом самозапуске нужно учитывать ещё и влияние, оказываемое электродвигателями друг на друга [4]. Так, например, при снижении напряжения питающей сети ниже некоторого значения асинхронные двигатели, для которых эта величина близка к границе их статической устойчивости, начинают тормозиться, за счет чего значительно увеличивается потребляемый ими ток, что провоцирует дальнейшее снижение напряжения на шинах остальных двигателей. Это может привести к переходу на пусковой участок механической характеристики тех двигателей, которые ещё удерживались в работе. Дальнейшее снижение напряжения приводит к «лавине» напряжения [5, с.122-123].

Таким образом, для осуществления группового самозапуска требуется комплексный подход и соблюдение множества условий, определение которых являлось целью проведенного исследования.

ОБЪЕКТ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для успешного самозапуска электроприводов смешанного состава на НПС нужно определить оптимальные уставки устройств релейной защиты и автоматики системы [6]. Для этого необходимо построить экспериментальную границу динамической устойчивости при естественном поведении электротехнической системы, то есть без учета работы релейной защиты и автоматики. Данная граница при этом наглядно показывает области возможного и потенциально успешного самозапуска. Таким образом, уставки будут учитывать параметры электротехнической системы, что позволит приблизить её поведение к поведению в естественных условиях и в большей степени использовать запас динамической устойчивости.

Объектом исследования является действующая НПС, электротехническая система (далее ЭТС) которой содержит разнородную электродвигательную нагрузку смешанного состава большой единичной мощности: АД серии 5А, номинальная мощность каждого из которых составляет 5 МВт, и СД серии СТД номинальной мощностью по 6,3 МВт каждый. Схема ЭТС представлена на рис. 1. На каждой секции шин один из двигателей является резервным согласно режимам перекачки данной НПС. Помимо электродвигателей приводов центробежных насосов в состав каждой секции дополнительно входит низковольтная электродвигательная нагрузка. На обоих вводах нагрузка идентична, и в связи с этим одна цифровая модель используется для обоих вводов, что позволяет сократить время на экспериментальную часть.

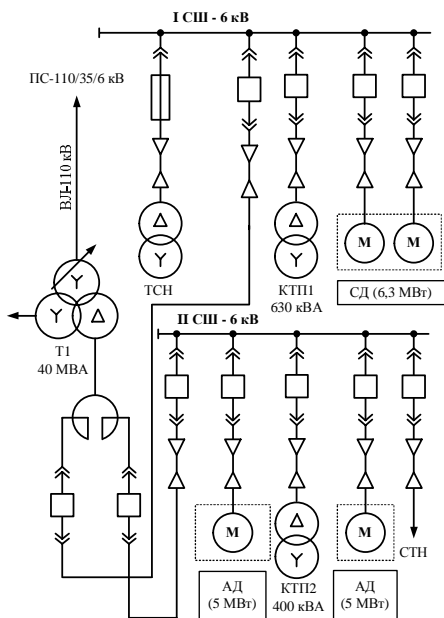


Рис. 1. Схема 1-го ввода электротехнической системы нефтеперекачивающей станции

ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ

В качестве среды моделирования выбран программный комплекс ЕТАР. Данный программный комплекс содержит в себе ряд модулей, предназначенных для анализа электромеханических переходных процессов. В основе расчетов лежит метод Ньютона-Рафсона. Асинхронные двигатели представлены Т-образной схемой замещения. Параметры АД главного электропривода представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики асинхронных двигателей

Тип	5А3МВ-5000	5АМ315МА2	5АМ280S2
Параметры	Значение	Значение	Значение
Номинальная мощность, кВт	5000	200	110
Номинальное напряжение, кВ	6	0,38	0,38
Частота вращения, мин ⁻¹	2985	2970	2965
Коэффициент мощности	0,9	0,93	0,92
КПД, %	97,3	95,0	93,5
Кратность максимального вращающего момента, о. е.	2,7	2,7	2,3
Кратность пускового вращающего момента, о. е.	0,8	1,8	1,6
Кратность пускового тока, о. е.	7,0	8,0	6,5

На этой платформе построена цифровая модель электротехнической системы рассматриваемой НПС. Система внешнего электроснабжения представлена моделью «ЭДС за сопротивлением» и включает источник синусоидального напряжения 110 кВ мощностью короткого замыкания 481,3 МВА, что эквивалентно реактансу системы $x_c=24,3$ Ом. Сопротивление системы установлено до зажимов трансформатора Т1 и содержит в себе сопротивление воздушной линии, подходящей к НПС. Электротехническая система связана с питающей энергосистемой через понижающий трансформатор Т-1 ТДТН-40000/110. Технические характеристики трансформатора представлены в табл. 2. Обмотки низшего напряжения (6 кВ) трансформатора связаны с секциями шин через реакторы типа РТСТ 6-4000-0,18, технические характеристики которого представлены в табл. 3.

Электротехническая система содержит четыре секции шин 6 кВ, I и II относятся к первому вводу. Как уже упоминалось выше, на I и III, а также на II и IV секциях шин нагрузка одинаковая, в связи с этим представлена подробная информация только по I и II секциям.

Таблица 2
Технические характеристики трансформатора ГПП

Тип	ТДТН-40000/110	
Параметры	Значение	
Номинальная мощность, кВА	40000	
Номинальное напряжение обмоток, кВ	ВН	115
	СН	38,5
	НН	6,6
Схема и группа соединения обмоток	Yн/Yн/Δ-0-11	
Потери холостого хода, кВт	В-С	30
	В-Н	30
	В-С	30
Потери короткого замыкания, кВт	В-С	200
	В-Н	200
	В-С	200
Напряжение короткого замыкания, %	В-С	10,5
	В-Н	17,5
	С-Н	6,5
Ток холостого хода, %	0,23	
Сопротивление между выводами ВН-СН, %	10,5	
Сопротивление между выводами ВН-НН, %	17,5	
Сопротивление между выводами СН-НН, %	6,5	

Таблица 3
Технические характеристики реактора РТСТ 6-4000-0,18

Параметры	Значение
Напряжение сети, кВ	6
Номинальный ток, А	4000
Номинальное индуктивное сопротивление, Ом	0,18
Ток термической стойкости, кА (6 с)	32,1
Ток электродинамической устойчивости, кА	81,9

К первой секции шин (I СШ) присоединены:

- трансформатор собственных нужд (ТСН) ТМГ-40/6 (технические характеристики трансформатора ТМГ-40/6 представлены в табл. 4);

- комплектная трансформаторная подстанция (КТП-1), в составе которой трансформатор типа ТМГ-630/6 (технические характеристики трансформатора ТМГ-630/6 представлены в табл. 4);

- два синхронных двигателя серии СТД номинальной мощностью по 6300 кВт каждый (технические характеристики синхронных двигателей представлены в табл. 5).

Ко второй секции шин (II СШ) присоединены:

- два асинхронных двигателя серии 5 А, номинальная мощность каждого из которых составляет 5000 кВт (технические характеристики асинхронных двигателей представлены в табл. 1),

- комплектная трансформаторная подстанция (КТП-2), в составе которой трансформатор типа ТМГ-400/6 (технические характеристики трансформатора ТМГ-400/6 представлены в табл. 3).

Таблица 4
Технические характеристики трансформаторов ТП

Тип	ТМГ-400/6		ТМГ-630/6		ТМГ-40/6	
Параметры	Значение		Значение		Значение	
Номинальная мощность, кВА	400		630		40	
Номинальное напряжение обмоток, кВ	ВН	6	ВН	6	ВН	6
	НН	0,4	НН	0,4	НН	0,4
Схема и группа соединения обмоток	Δ/Yн-11		Δ/Yн-11		Δ/Yн-11	
Потери холостого хода, кВт	0,78		1,07		0,16	
Потери короткого замыкания, кВт	5,5		7,6		0,88	
Напряжение короткого замыкания, %	4,5		5,5		4,5	
Ток холостого хода, %	1,4		1,0		2,8	

Таблица 5
Технические характеристики синхронных двигателей

Параметры	Значение
Номинальная мощность, кВт	6300
Номинальное напряжение, кВ	6
Частота вращения, мин ⁻¹	3000
КПД, %	97,6
Индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси, %	218
Индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси, %	218
Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси, %	26,4
Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси, %	26,4
Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси, %	14,9
Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси, %	15,2
Переходная постоянная времени, с	6,03

Все двигатели в нормальном режиме работают с коэффициентом загрузки по активной мощности, равным 90%, и нагружены на одинаковые механизмы с вентиляторным моментом сопротивления.

КТП-1 представлена статической нагрузкой величиной 126 кВт и двигательной нагрузкой – 189 кВт. В качестве эквивалентной двигательной нагрузки выбран двигатель серии 5АМ315МА2 (основные технические данные представлены в табл. 1).

КТП-2 представлена статической нагрузкой 80 кВт, двигательной нагрузкой 120 кВт. В качестве эквивалентной двигательной нагрузки выбран двигатель серии 5АМ280S2 (основные технические данные представлены в табл. 1).

Модель ЭТС состоит из общепринятых схем замещения. Особенностью исследованной цифровой модели является наличие единичных АД и СД с близкими по значению мощностями и малой долей низковольтной нагрузки. Данная модель позволила установить поведение ЭТС смешанного состава при таком соотношении мощностей.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате серии модельных экспериментов определены значения показателей статической и динамической устойчивости ЭТС.

Установлено, что при снижении напряжения сети на 27% статическая устойчивость системы нарушается. Данная ситуация характеризуется переходом на пусковую участок механической характеристики всех АД и последующим выпадением из синхронизма СД. Как уже было упомянуто выше, после перехода АД на пусковой участок механической характеристики, синхронные могут оставаться в работе, поскольку их электромагнитный момент пропорционален напряжению, в отличие от АД, у которых он зависит от квадрата питающего напряжения. Но в данном случае, поскольку мощности СД и АД близки по своей величине, снижение напряжения на шинах за счет влияния асинхронного привода оказывает значительное влияние на работу нагрузки, состоящей из СД. Графики изменения тока АД и СД при снижении напряжения на 26 и 27% от номинальной величины представлены на рис. 2 и 3 соответственно. Таким образом, напряжение статической устойчивости составляет $U_{c,y} = 0,74$ о.е. или 74%

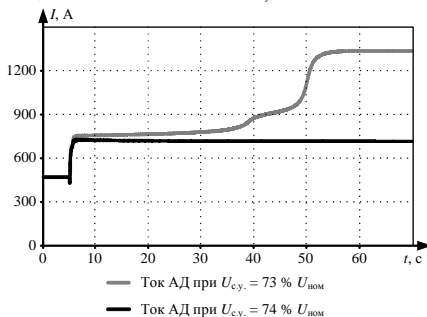


Рис. 2. График изменения тока АД при $U_{c,y} = 74\%$ и при $U_{c,y} = 73\%$

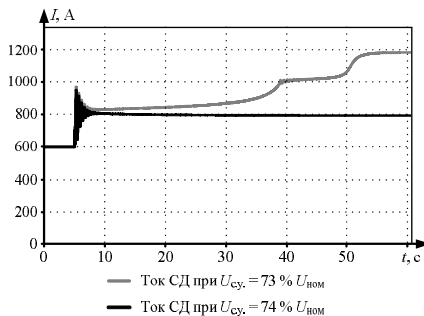


Рис. 3. График изменения тока СД при $U_{c,y} = 74\%$ и при $U_{c,y} = 73\%$

В результате моделирования в ПК ЕТАР определено, что время динамической устойчивости для данной ЭТС составляет $\tau_0 = 128$ мс. При прерывании напряжения длительностью 129 мс СД выпадает из синхронизма, что мы можем наблюдать на рис. 4, это является достаточным признаком для идентификации факта потери устойчивости. Возвращение к нормальному состоянию системы при этом возможно в следующем порядке: гашение поля в СД, потерявшем устойчивость; повторный разгон этой машины после восстановления нормального уровня напряжения до подсинхронной скорости; подача возбуждения и втягивание машины в синхронизм. В данной работе такая задача не рассматривалась.

Стоит отметить, что запас времени до выпадения двигателя из синхронизма определяется скоростью изменения угла Θ . Сама эта скорость для случая провала ЭДС до нуля определяется только инерционными свойствами электропривода [7, с. 204].

Также на рис. 5 видно, что АД при перерыве электроснабжения продолжительностью 129 мс не переходит в пусковой режим, а через определенное время возвращается к нормальной работе. Это связано с тем, что в это же время СД выпадает из синхронизма и в конце концов, останавливается, благодаря чему напряжение на шинах возрастает до номинальной величины, что позволяет АД вернуться к нормальной работе. Однако затянутость переходных процессов неблагоприятно скажется на состоянии асинхронных машин. Была также отключена синхронная составляющая электродвигательной нагрузки и определен запас динамической устойчивости отдельно для асинхронного привода. Результаты моделирования показали, что АД при отключении СД обладает абсолютной динамической устойчивостью, что для данной схемы аналогично пуску АД. Большая динамическая устойчивость объясняется тем, что при достаточно малом значении эквивалентного сопротивления питающей энергосистемы величина мощности энергосистемы значительно больше мощности единичного электропривода [8].

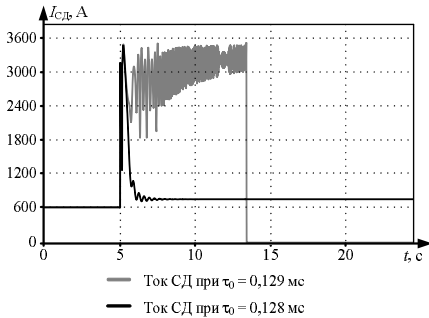


Рис. 4. График изменения тока СД при $\tau_0 = 128$ мс и при $\tau_0 = 129$ мс

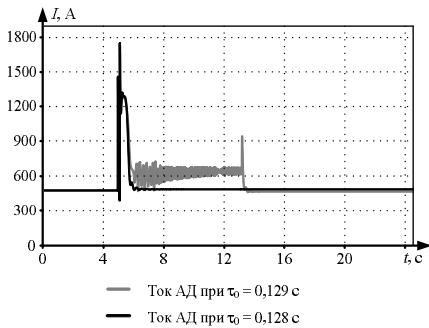


Рис. 5. График изменения тока АД ПРИ $\tau_0 = 128$ мс и при $\tau_0 = 129$ мс

Также установлено, что значительную составляющую в суммарный пусковой ток при восстановлении электропитания вносит ток СД. Это можно наглядно продемонстрировать графиком токов двигателей на границе динамической устойчивости (рис. 6).

На рис. 6 видно, что, несмотря на то, что мощности АД и СД по своей величине близки, после снижения напряжения до 10% продолжительностью 145 мс «бросок» тока СД (3411 А) почти в два раза превышает «бросок» тока АД (1719 А). Это объясняется тем, что при нормальном режиме работы ЭДС СД близка к величине напряжения сети и при выбеге её величина снижается медленнее, чем у АД, и в момент восстановления питания остаточная ЭДС у СД может оказаться весьма значительной.

По результатам моделирования построена граница динамической устойчивости для системы. Вид данной зависимости максимально допустимого времени перерыва в электроснабжении от величины остаточного напряжения представлен на рис. 7. Результаты моделирования отображены в табл. 6.

Характерной особенностью границы динамической устойчивости для системы смешанного состава считается отсутствие непрерывности: граница динамической устойчивости распадается на две ветви, причём переход с одной ветви на другую происходит скачком, то есть имеется точка бифуркации.

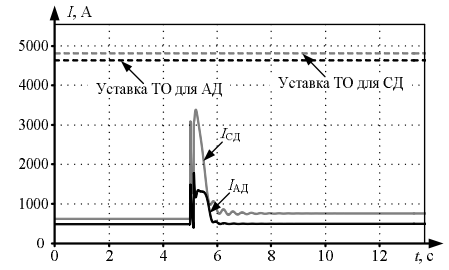


Рис. 6. Сравнение уставок токовых отсечек (ТО) АД и СД в условиях самого тяжёлого самозапуска

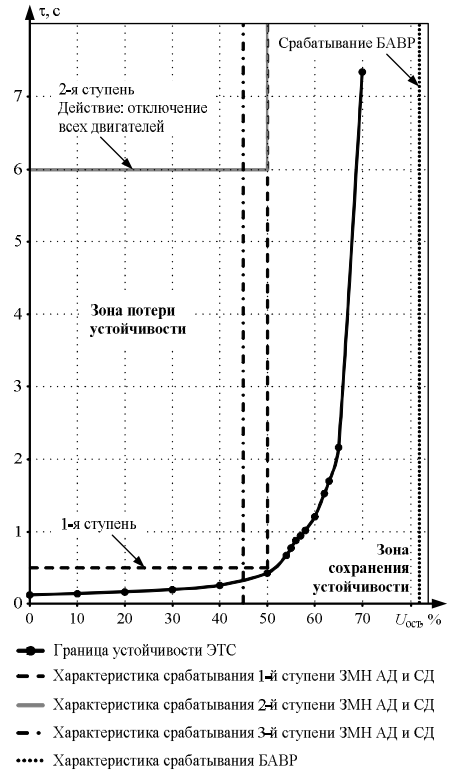


Рис. 7. Характеристика защиты минимального напряжения до корректировки её параметров

Это объясняется различной физикой процессов, приводящих к потере устойчивости при различных значениях остаточного напряжения. Так, при малых значениях остаточного напряжения потеря динамической устойчивости обусловлена потерей устойчивости именно синхронного электропривода. При больших значениях остаточного напряжения устойчивость системы теряется в основном за счет нарушения устойчивости асинхронного электропривода [9].

Таблица 6

Результаты моделирования границы устойчивости

Остаточное напряжение $U_{с.в.}, \%$	Запас динамической устойчивости $\tau_0, с$
0	0,128
10	0,145
20	0,168
30	0,201
40	0,260
50	0,429
54	0,673
55	0,775
56	0,880
57	0,944
58	1,018
60	1,208
62	1,527
63	1,699
65	2,163
70	7,345

Однако в рассматриваемой ЭТС такого скачкообразного изменения динамической устойчивости не наблюдается. Заметно только нарушение непрерывности кривой при остаточном напряжении в районе 56%. Мощности АД и СД близки по величине, доля низковольтной нагрузки незначительна, поэтому скачок отсутствует.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОРРЕКТИРОВКЕ УСТАВОК РЗАИ

Следующий шаг после построения границы устойчивости – это корректировка уставок устройств релейной защиты и автоматики. Корректная настройка параметров защиты может помочь избежать многих ложных отключений двигателя [10].

Выполнена проверка уставок срабатывания токовых защит и защит от перегрузки двигателей на несрабатывание в области сохранения устойчивости. В противном случае возможны ложные срабатывания защит во время потенциально успешного самозапуска электродвигателей. Результаты моделирования показали, что уставки существующих токовых отсечек и защит от перегрузки отстроены корректно. Сравнение результатов моделирования с уставками срабатывания токовых отсечек представлено на рис. 6. Также было установлено, что только при нарушении статической устойчивости срабатывают защиты от перегрузки асинхронных и синхронных двигателей: защита от перегрузки АД срабатывает на 46,7-й секунде; защита от перегрузки СД срабатывает на 53,9-й секунде. Возникновение провала такой продолжительности маловероятно, поэтому корректировка защит от перегрузки не требуется.

Основное внимание необходимо уделить защите минимального напряжения (далее ЗМН), поскольку именно от работы этой защиты зависит сохранение замкнутым выключателя двигателя, сохранения связи с энергосистемой и последующий самозапуск [11]. Данные, полученные в результате моделирования в ПК ЕТАР, показали, что параметры существующей много-

ступенчатой ЗМН не удовлетворяют условиям группового самозапуска. Характеристика ЗМН не охватывает всю область сохранения устойчивости, в чём можно убедиться, обратив внимание на рис. 7. Также эта защита была одинаково отстроена как для секции шин с СД, так и для секции с АД, что не позволяло полностью использовать запас динамической устойчивости АД. В связи с этим предложено изменить логику работы и уставки ЗМН как для секций с СД, так для секций с АД так, как представлено на рис. 8.

Предложено отказаться от общепринятой логики работы ЗМН и АВР, чтобы сократить число необоснованных отключений. Важно подчеркнуть, что реализация ЗМН осуществляется на уже имеющейся элементной базе.

Для СД 1-я ступень защиты должна обеспечить отключение синхронной составляющей электродвигательной нагрузки повреждённой секции шин при неуспешной работе быстродействующего ввода резерва (далее БАВР) или после его срабатывания в случае снижения напряжения ниже 3000 В, с выдержкой времени длительностью 0,128 секунды. Выдержка времени 1-й ступени при этом превышает время работы БАВР, которое составляет 40–80 мс, и не повлияет на его работу. Реализация данной ступени позволит предотвратить потерю питания на исправной секции шин.

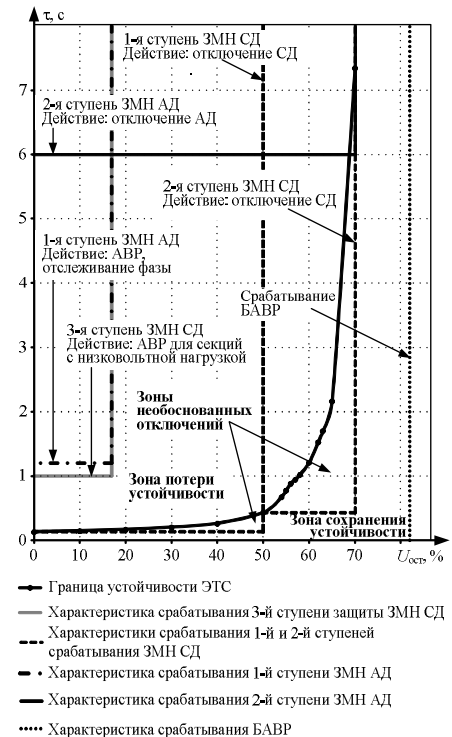


Рис. 8. Характеристика защиты минимального напряжения после корректировки её параметров

2-я ступень ЗМН СД также должна осуществлять отключение СД, участвующих в самозапуске, в другой области границы устойчивости, что сократит зону необоснованных отключений. Напряженье срабатывания этой ступени защиты около 4200 В, время выдержки – 0,429 секунд. Это необходимо для того, чтобы избежать потери устойчивости системы в целом.

3-я ступень ЗМН СД подает сигнал на работу АВР. При низком остаточном напряжении (порядка 1000 В) с выдержкой по времени около 1 секунды проверяется наличие питания на соседней секции шин, и при достаточном напряжении подаётся сигнал на отключение вводного выключателя повреждённой секции и включение секционного выключателя. Таким образом, предлагается использовать работу ЗМН как пусковой орган АВР для электродвигателей взаиморезевируемых механизмов.

Для секции с АД ЗМН рекомендуется отстраивать иначе. Во-первых, ЗМН АД предлагается выполнить двухступенчатой. Во-вторых, необходимо учитывать то, что в рассматриваемом примере АД обладает абсолютной динамической устойчивостью, и, следовательно, нет необходимости отключать через 0,5 секунды ввод РП, поскольку время перерыва питания для асинхронных приводов ограничивается временем работы защит от перегрузки. В-третьих, необходимо помнить, что, для того чтобы включить выбегающий АД (время выбега которого составляет 15 секунд) на соседний ввод, необходимо дожидаться затухания ЭДС до 30% от номинального напряжения. У двигателя мощностью 5 МВт это займёт около 1–1,2 секунд. Следовательно, до этого момента должен быть запрет на секционирование, или же должны отслеживаться фазы напряжения.

Несоблюдение этого условия может привести к броску тока самозапуска, в случае, если вектор ЭДС и вектор напряжения питающей сети будут находиться в противофазе [12].

1-я ступень ЗМН АД выполняет функцию пускового органа АВР: при напряжении около 1000 В и по истечении 1,2 секунды подаётся сигнал на отключение ввода распределительного пункта (далее РП) и включение секционного выключателя, проверяя при этом фазу напряжения исправной шины.

2-я ступень при пониженном напряжении (около 4200 В) подает сигнал на отключение АД через 6 секунд, при условиях затянувшегося пуска (самозапуска). Уставка по напряжению выбрана из условия нарушения статической устойчивости второго ввода при работающем СД. Выдержка по времени подобрана с целью улучшения теплового режима машины при нарушении статической устойчивости.

Важно также отметить, что область, лежащая между кривой устойчивости и характеристикой срабатывания защиты, представляет собой область необоснованных отключений. Уменьшение данной области способствует снижению числа таких отключений и, соответственно, повышению эффективности функционирования ЭТС предприятия в целом [7, с. 257–265].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Корректировка уставок релейной защиты и автоматики в соответствии с границей динамической устойчивости электротехнической системы позволяет существенно расширить область устойчивой работы электротехнической системы. Корректировки требуют в том

числе уставки защиты минимального напряжения.

Изменение логики работы ЗМН на использование 1-й ступени защиты для отключения высоковольтных электроприводов, а 3-й (или 2-й) для запуска АВР позволяет расширить область использования самозапуска, не прибегая к подхвату и автоматическому повторному пуску. При условии, что на подхват накладываются ограничения по остаточной ЭДС, а на автоматический повторный пуск по числу пусков из горячего состояния, самозапуск является приоритетным способом для сохранения технологического процесса.

Определено, что при мощностях СД и АД, близких по своей величине, скачкообразное изменение времени динамической устойчивости на границе вырождается в точку. При этом непрерывность кривой в этой точке по-прежнему отсутствует. Учитывая, что такая схема электроснабжения является одной из типовых для нефтеперерабатывающих станций, этот факт необходимо учитывать при настройке релейной защиты и автоматики.

Значения уставок РЗА требуют расчёта для каждой электротехнической системы и не могут быть продублированы на основании факта идентичности схем электроснабжения предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фриман Р.Э., Иванов С.А., Бородавкин. Магистральные трубопроводы. Основные сведения. М.: Недра, 1976. 161 с.
2. Трубопроводный транспорт нефти: для того: в 2 т. / С.М. Вайншток, В.В. Новоселов, А.Д. Прохоров, А.М. Шаммазов и др.; под ред. С. М. Вайнштока. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. Т. 2. 621 с.
3. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 136 с.
4. Егоров А.В., Комков А.Н., Малиновская Г.Н. К вопросу о взаимном влиянии электроприводов в составе электротехнической системы // Территория НЕФТЕГАЗ. 2016. №2.
5. Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя М.: Элекс-КМ, 2005. 408 с.
6. Малафеев А.В., Трemasов М. А. Анализ устойчивости двигателей собственных нужд тепловых электростанций с учетом характеристик приводных механизмов // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С. 6-13. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-6-13.
7. Ершов М.С., Егоров А.В., Трифонова А.В. Устойчивость промышленных электротехнических систем. М.: ООО «Издательский дом «Недра», 2010. 319 с.
8. Ершов М.С., Егоров А.В., Федоров В.А. Некоторые вопросы повышения устойчивости электроприводов многомашиного комплекса с непрерывным технологическим процессом при возмущениях в системе электроснабжения // Промышленная энергетика. 1992. №7.
9. Ершов М. С., Егоров А. В., Яценко Д. Е. О влиянии параметров энергосистемы на устойчивость узлов электрической нагрузки // Промышленная энергетика. 1997. №5.
10. Tarek I. El-Shennawy, Mahmoud A. El-Gammal, Amr Y. Abou-Ghazala, "Voltage Sag Effects on the Process Continuity of a Refinery with Induction Motors Loads," "The 2009 World Congress on Power Engineering (WCPEE'09), Cairo, Egypt, 5-8 October 2009.
11. Ограничение провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий / Г.П. Корнилов, А.Ю. Коваленко, А.А. Николаев, И.Р. Абдулвелеев, Т.Р. Храмшин. // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №2(23). С.44-46. DOI: 10.18503/2311-8318-2014-2(23)-44-46.
12. Gomez J.C., M.M. Morcos, C.A. Reineri and G.N. Campatelli, 2002. Behavior of induction motor due to voltage sags and short interruptions. IEEE Trans. Power Delivery, 17: 434-440. DOI: 10.1109/61.997914.

Поступила в редакцию 01 ноября 2018 г.

SIMULATION OF ELECTRIC DRIVE SELF-START OF HEAD UNITS AT THE OIL PUMPING STATION

Anastasiya A. Zakharova

Bachelor of Science, Master's degree student, Department of Theoretical Power Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia. E-mail: anastasiyazakharovaalex@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3538-0248>

Alexander N. Komkov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Theoretical Power Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1010-6971>

The article is concerned with the issues related to the implementation of the group self-starting electric drives of the head pump units at the oil pumping station. Since oil pumping stations are high-risk facilities, this problem is particularly urgent for them because of the stringent requirements for the continuity of the processes of pipe-wire transportation of oil and oil products.

The self-start of a group of electric drives of mixed composition in the ETAP software package for the existing oil pumping station has been studied and simulated. The task of ensuring the self-starting of electric motors of precisely a large unit power is considered in order to study their mutual influence on each other. As a result of conducting multiple model experiments, the values of the voltage of static stability and the time of dynamic stability of the electrical system of the enterprise were determined. On the basis of the data obtained, the boundary of the dynamic stability of the system has been built, the optimal conditions for the implementation of group self-starting have been determined, compliance with which allows uninterrupted operation of oil pumping stations during voltage dips in the external power supply system. Particular attention is paid to assessing the settings and the selectivity of existing devices for relay protection and automation since only with their correct detuning, self-starting can expand the area of stable operation of the electrical system and keep electric drives of main pumping units in operation after power failures.

On the basis of the performed analysis, a variant of protection of the minimum voltage was proposed taking into account all the features of the implementation of self-starting electric drives of mixed composition at the pump station under consideration. The absence of an abrupt change at the time of dynamic stability is established for an electrical system of mixed composition with electric drives of high unit power at comparable powers of asynchronous and synchronous motor loads. The bifurcation point on the border of dynamic stability is preserved.

Keywords: self-start, electrical system of mixed composition, oil pumping station, stability, synchronous electric motor, asynchronous electric motor, undervoltage protection, simulation, automatic transfer of reserve, ETAP software.

REFERENCES

1. Freeman R.E., Ivanov S.A., Borodavkin. *Magistralnye truboprovody. Osnovnye svedeniya* [Main pipelines. Basic information]. M.: Nedra, 1976. 161 p. (In Russian)
2. Weinstock S.M., Novoselov V.V., Prokhorov A.D., Shamazov A.M., et al. *Truboprovodnyi transport nefii* [Pipeline transport of oil]: textbook for universities: in 2 volumes / Under the editorship of S.M. Weinstock. Moscow: OOO

- Nedra-Business Center, 2004, vol. 2. 621 p. (In Russian)
3. Golodnov Yu.M. *Samozapusk elektrodvigateley* [Self-starting of electric motors], 2nd revised and enlarged edition. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 136 p. (In Russian)
4. Egorov A.V., Komkov A.N., Malinovskaya G.N. On the issue of mutual influence of electric drives in the composition of the electro-technical system. *Territory of NEFTEGAZ*, 2016, no. 2. (In Russian)
5. Gurevich Yu.E., Kabikov K.V. *Osobennosti elektrosnabzheniya, orientirovannogo na bespereboinoiuiu rabotu promyshlennogo potrebitelia* [Features of power supply focused on the uninterrupted operation of the industrial consumer]. Moscow: Eleks-KM, 2005, 408 p. (In Russian)
6. Malafeev A.V., Tremasov M.A. Analysis of the stability of the engines of their own needs of thermal power plants taking into account the characteristics of the driving mechanisms. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes]. 2016, no. 4 (33), pp. 6-13. DOI: 10.18503 / 2311-8318-2016-4 (33) -6-13. (In Russian)
7. Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. *Ustoychivost promyshlennykh elektrotehnicheskikh sistem* [Stability of industrial electrical systems]. M.: Publishing House "Nedra" LLC, 2010. 319 p. (In Russian)
8. Ershov M.S., Egorov A.V., Fedorov V.A. Some issues of increasing the stability of electrical receivers of a multi-machine complex with a continuous technological process under disturbances in the power supply system. *Promyshlennaya energetika* [Industrial engineering], 1992, no. 7. (In Russian)
9. Ershov M.S., Egorov A.V., Yatsenko D.E. On the influence of power system parameters on the stability of electrical load nodes. *Promyshlennaya energetika* [Industrial engineering], 1997, no.5. (In Russian)
10. Tarek I. El-Shennawy, Mahmoud A. El-Gammal, Amr Y. Abou-Ghazala, "World Congress on Power Engineering (WCPEE '09)", Cairo, Egypt, October 5-8, 2009.
11. Kornilov GP, Kovalenko, A.Yu., Nikolaev A.A., Abdulvelev I.R., Khramshin, T.R. Restriction of voltage dips in power supply systems of industrial enterprises. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2014, no. 2 (23), pp. 44-46. DOI: 10.18503 / 2311-8318-2014-2(23)-44-46. (In Russian)
12. Gomez J.C., M.M. Morcos, C.A. Reineri and G.N. Campatelli, 2002. Behavior of the motor induction motor saver and short interruptions. IEEE Trans. Power Delivery, 17: 434-440. DOI: 10.1109 / 61.997914.

Zakharova A.A., Komkov A.N. Моделирование самозапуска электроприводов головных агрегатов нефтеперерабатывающей станции // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 35-42. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-35-42)

Zakharova A.A., Komkov A.N. Simulation of Electric Drive Self-Start of Head Units at the Oil Pumping Station. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 35-42. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-35-42)