

## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.311.22

DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-6-13

Малафеев А.В.<sup>1</sup>, Тремасов М.А.<sup>2</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»<sup>2</sup>ОАО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ»**АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ  
С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ**

В работе проводится анализ устойчивости приводных асинхронных двигателей механизмов собственных нужд тепловой электростанции. При расчете учитываются рабочие (напорные) характеристики насосов и тягодутьевых машин, а также характеристики трубопроводных сетей, необходимые для определения моментно-скоростных характеристик механизмов. Полученная методика расчета была интегрирована в программное обеспечение «КАТРАН», где расчет переходных процессов проводится на основе метода последовательных интервалов с учетом уточненной аналитической зависимости момента от скорости рабочего механизма. Моделирование аварийных режимов позволяет определить успешность самозапуска генераторов и двигателей собственных нужд электростанции. На основе смоделированных аварийных режимов выявлены сенсорные элементы в схеме объекта исследования на основе оценки устойчивости генераторов и двигателей собственных нужд. Разработанная методика может быть использована для более точного выбора параметров срабатывания релейной и технологической защит в системах собственных нужд тепловых электростанций для более надежной работы основного и вспомогательного технологического оборудования.

**Ключевые слова:** собственные нужды, питательные насосы, рабочие характеристики, характеристика трубопроводной сети, моментно-скоростные характеристики, динамическая устойчивость, самозапуск двигателей, сенсорность.

**ВВЕДЕНИЕ**

Обеспечение стабильной работы электроустановок собственных нужд (СН) электростанции является приоритетной задачей поддержания электроснабжения основных приемников электрической энергии как самой электростанции (котлы, турбины, генераторы), так и цехового оборудования промышленного предприятия. Так как механизмы СН заводских электростанций относятся к приемникам I категории по надежности электроснабжения, то следует уделить внимание быстрому восстановлению работы этих приемников в послеаварийном режиме, а также выявить места с наихудшими показателями устойчивости двигателей СН. Это позволит выявить участки схемы, повреждение которых в наибольшей степени затрагивает технологическое оборудование. Кроме того, анализ кривых основных параметров асинхронных двигателей от времени позволит выполнить оценку эффективности уточненной методики по сравнению с упрощенными методами расчета устойчивости. Поэтому правильный выбор уставок и выдержек времени электрических защит и согласование с уставками и выдержками времени технологических защит позволяет обеспечить итоговую успешность самозапуска.

Исследованию устойчивости механизмов СН тепловых электростанций уделяется большое внимание. Для оценки успешности самозапуска механизмов СН применяются различные методы расчета, основанные на решении системы дифференциальных уравнений, описывающих работу ЭД, питающихся от общих шин. В [1] рассматриваются следующие методы расчета:

1. *Метод Донецкого политехнического института.* Анализ группового выбега электродвигателей (ЭД) ведется по дифференциальным уравнениям. Расчет

процесса после восстановления питания СН ведется по алгебраическим уравнениям и дифференциальным уравнениям движения роторов ЭД.

2. *Упрощенный метод Союзтехэнерго.* Расчет самозапуска основан на решении уравнений движения роторов ЭД СН методом последовательных интервалов. Основные допущения метода: выбег ЭД рассматривается как индивидуальный, моменты сопротивления механизмов СН моделируются степенными полиномами, вращающий момент и ток ЭД определяются по приближенным обобщенным аналитическим выражениям, не учитывается активное сопротивление ЭД.

3. *Упрощенный расчет режима группового выбега электродвигателей методом последовательных интервалов* [2]. Расчет заключается в определении групповой эквивалентной скорости вращения ЭД на основе механической постоянной времени каждого агрегата. После чего находится фиктивное время индивидуального выбега каждого ЭД до эквивалентной частоты вращения. Рассчитывается полное эквивалентное время индивидуального выбега каждого ЭД. Вычисляется частота вращения каждого ЭД к концу перерыва питания.

В работе [3] проводится анализ устойчивости двигателей СН тепловой электростанции на основе полученных в результате аппроксимации моментно-скоростных характеристик. Основным допущением метода является использование степенных зависимостей момента от скорости при расчете выбега механизма при открытом обратном клапане.

Для выявления слабых мест в системе электроснабжения потребителей в [4] вводится понятие «сенсорность», т.е. степень влияния возмущения на электроустановку. Это позволяет выявить наиболее неустойчивые элементы схемы, найти способ повысить их надежность работы для более стабильной работы системы.

В данной работе предлагается анализ устойчивости двигателей СН центральной электростанции (ЦЭС) ОАО «ММК» на основе уточненной методики расчета моментно-скоростных характеристик.

#### РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЗМОВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

Для построения моментно-скоростных характеристик механизмов СН необходимо рассчитать рабочие характеристики насосов и тягодутьевых механизмов по методике, приведенной в [5]. При расчете учитываются следующие составляющие потерь напора: потери на удар и вихреобразование и потери на трение, описанные в [6]. Полученные значения потерь вычитаются из линейной рабочей характеристики механизма, в результате чего получается рабочая характеристика механизма с учетом потерь, аналогичная паспортной характеристике. В процессе расчета большое влияние оказывают конструктивные параметры центробежных машин, которые могут отличаться в связи с различным технологическим назначением производства электроэнергии и тепла.

Производительность центробежного механизма при заданной частоте вращения его рабочего колеса определяется не только его главной  $H - Q$  характеристикой, но и свойствами трубопроводной сети, на которую он работает. Все основные центробежные насосы и вентиляторы, установленные на станции, работают на сети с некоторым противодавлением, за исключением дымососов, в трубопроводной сети которых присутствует естественная тяга, способствующая выдуванию продуктов сгорания в атмосферу. На основе расчета, приведенного в [5], определяется характеристика трубопроводной сети насосов, имеющая статическую и динамическую составляющие напора. Вследствие незначительной разницы скоростей движения жидкости в точках измерения давления в резервуарах, динамической составляющей чаще всего пренебрегают.

$$H_c = H_r + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \Delta H, \quad (1)$$

где  $H_r$  – разность геодезических высот между уровнями или точками измерения давления в резервуарах, м;  $p_1, p_2$  – давление в резервуаре на стороне всасывания и давление в резервуаре на стороне нагнетания соответственно, Па;  $v_1, v_2$  – скорости движения жидкости в точках измерения давления в резервуарах, м/с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\Delta H$  – потери напора в подводящем и напорном трубопроводах, м.

Для тягодутьевых машин определение характеристики сети рассмотрено в [7]. Отличительной особенностью расчета является наличие естественной тяги, что, таким образом, приводит к отсутствию срыва подачи механизма, т.е. отсутствию точек пересечения рабочей характеристики и характеристики трубопроводной сети.

$$H_{тр} = aQ^2 - H_t, \quad (2)$$

где  $a$  – коэффициент трубопровода;  $H_t$  – естественная тяга, м.

Таким образом, в процессе расчета рабочих характеристик механизмов собственных нужд учитываются как конструктивные параметры механизмов, так и характеристика трубопроводной сети, что позволяет более точно отразить режим работы центробежной машины.

#### РАСЧЕТ МОМЕНТНО-СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЗМОВ

На основе полученных рабочих характеристик центробежных машин и характеристик трубопроводной сети рассчитываются моментно-скоростные характеристики механизмов СН по методике, приведенной в [5]. На основе методики получено семейство моментно-скоростных характеристик питательных насосов ЦЭС ОАО «ММК», представленное на рис. 1, из которого видно, что составляющими суммарного момента (кривая 5) являются: полезный момент (кривая 1), затрачиваемый на полезную работу насоса, момент на гидравлические потери (кривая 2) и момент на потери на дисковое трение (кривая 3), значения которого малы и достигают 0,013 о.е. При срыве подачи рассматриваются два возможных режима работы насоса: при открытом и закрытом обратном клапане. В случае, когда обратный клапан неисправен (открыт), насос переходит в режим противотока (кривая 4), где расчет проводится на основе универсальных кривых обратимых гидромашин, представленных в [8]. Если обратный клапан закрыт, то моментно-скоростная характеристика рассчитывается по квадратичной зависимости. Часто в приближенных расчетах применяется кубическая зависимость момента от скорости (кривая 6), которая учитывает противодавление со стороны трубопроводной сети. При номинальной скорости вращения значения относительных моментов, полученных по уточненной и упрощенной методикам, отличаются на 17%.

Основным отличием уточненной методики расчета моментно-скоростных характеристик от упрощенных расчетов является применение конструктивных параметров центробежной машины, а также точное действительное значение противодавления со стороны трубопроводной сети.

Полученная уточненная методика может применяться при расчетах переходных процессов методом численного интегрирования.

#### РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Исследование устойчивости сложных электрических систем в большинстве основаны на расчете переходных процессов путем численного интегрирования дифференциальных уравнений системы при различных исходных уравнениях. Расчет производится для оценки сохранения устойчивости при различных возмущениях, возникающих в сети.

Так как в качестве приводных механизмов СН на станции используются асинхронные двигатели, то рассмотрим расчет переходных режимов данных машин. Такие механизмы, как питательные, конденсатные, сетевые и циркуляционные насосы работают на систему с противодавлением, что соответствует кубической зависимости момента от скорости, а тягодутьевые машины – с вентиляторным моментом сопротивления на

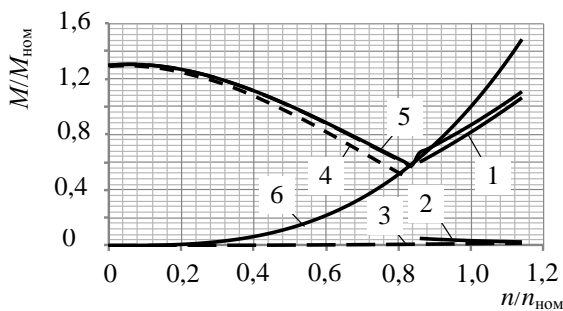


Рис. 1. Моментно-скоростные характеристики питательного насоса ПЭН-1

валу (квадратичная зависимость). Данные упрощения не позволяют учесть как конструктивные параметры машины, так и характеристику трубопроводной сети, что приводит к достаточно большой погрешности определения времени выбега механизма.

Кроме того, расчет переходных процессов в асинхронных двигателях в основном производится только с учетом изменения скольжения путем решения уравнения движения ротора. При этом не учитывается характер изменения тока статора, который при незначительной удаленности асинхронного двигателя от точки короткого замыкания может отрицательно влиять на динамическую устойчивость двигателя. Поэтому в работе [9] предлагается «для анализа переходных режимов асинхронных двигателей использовать способ их представления, основанный на использовании видоизмененных уравнений Парка-Горева».

Значение момента  $M_{\Sigma}$  определяется на основе уточненной методики, полученной ранее и приведенной в [5] по формуле:

$$M_{\Sigma} = M_{\Pi} + M_{д.т} + M_{г.п.}, \quad (3)$$

где  $M_{\Pi}$  - полезный момент, о.е.;  $M_{д.т}$  - момент на дисковое трение, о.е.;  $M_{г.п.}$  - момент на гидравлические потери, о.е.

При расчете механической мощности двигателя по (3) подставляется полученное значение суммарного момента:

$$P_{\text{мех}} = M_{\Sigma} \omega, \quad (4)$$

где  $\omega$  - угловая скорость вращения ротора двигателя.

Таким образом, в расчете учитывается влияние подпитки двигателем точки КЗ, которая создает дополнительный тормозной момент, что приводит к более быстрому опрокидыванию двигателя, а также влияет на его динамическую устойчивость. Кроме того, в расчет задается статический момент, полученный на основе разработанной методики, где учитываются как конструктивные параметры механизма, так и характеристика трубопроводной сети. Это позволяет более корректно произвести оценку самозапуска двигателей, выбрать уставку срабатывания РЗиА.

#### АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ МЕХАНИЗМОВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В СЕТИ

Полученная в [5] уточненная методика расчета моментно-скоростных характеристик приводов насосов и тягудутьевых механизмов позволяет произвести анализ

устойчивости основных механизмов собственных нужд электростанции за счет внедрения алгоритма расчета в программный комплекс «КАТРАН».

Одним из основных источников внешних возмущений на нормальную работу приводных двигателей является короткое замыкание (КЗ) в системе электропитания, которое характеризуется как степенью удаленности от потребителей, так и длительностью действия. Например, чем больше длительность действия КЗ, тем тяжелее будут условия самозапуска. Успешность самозапуска и его длительность в значительной степени зависит от продолжительности перерыва питания. С уменьшением паузы электродвигатели меньше тормозятся, ограничиваются токи самозапуска и повышается напряжение на шинах в момент подключения источника питания.

Что касается самозапуска электродвигателей СН, то значительного повышения надежности работы станции можно достигнуть, если при кратковременных снижениях или даже полном исчезновении напряжения на шинах СН, вызванных короткими замыканиями, не отключать электродвигатели ответственных механизмов от сети. Тогда после восстановления нормального напряжения начинается их самозапуск с промежуточной частоты вращения, до которой успели затормозиться двигатели в аварийном режиме. Вследствие больших пусковых токов в трансформаторах возникает значительное падение напряжения, групповой самозапуск происходит при пониженных напряжениях на зажимах электродвигателей и может быть успешным или неуспешным. Успешным самозапуском следует считать такой, при котором остаточное напряжение на шинах СН обеспечивает ускорение электродвигателей до номинальной частоты вращения за время, допустимое по условиям нагрева двигателей и сохранения устойчивости технологического режима станции.

Чтобы определить степень влияния возмущения на электроустановки, необходимо знать сенсорность элементов схемы. Элементы, которые подверглись наибольшему возмущению, называются сенсорами. Степень их возмущения в целом влияет на общее состояние системы. Как правило, сенсорами являются электропотребители, находящиеся ближе остальных к источнику возмущения. Также на максимальное отклонение от нормального режима влияют качания генераторов. При проворотах ротора генераторов наблюдается утяжеление режима, приводящее к еще большему возмущению сенсоров.

Для выявления сенсорности элементов схемы электростанции выполнена серия расчетов электромеханических переходных процессов механизмов СН в схеме ЦЭС ОАО «ММК» (рис. 2). Так как все потребителями являются асинхронные двигатели, то введем понятие  $\sigma$  - степень отклонения параметров режима, выраженная в средневзвешенном значении максимального изменения скольжения:

$$\sigma = \frac{P_1 \Delta s_1 + P_2 \Delta s_2 + \dots + P_n \Delta s_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n}, \quad (5)$$

где  $P$  - мощность асинхронного двигателя;  $\Delta s = s_{\text{max}} - s_{\text{min}}$  - разность максимального и минимального скольжений на исследуемом интервале времени.

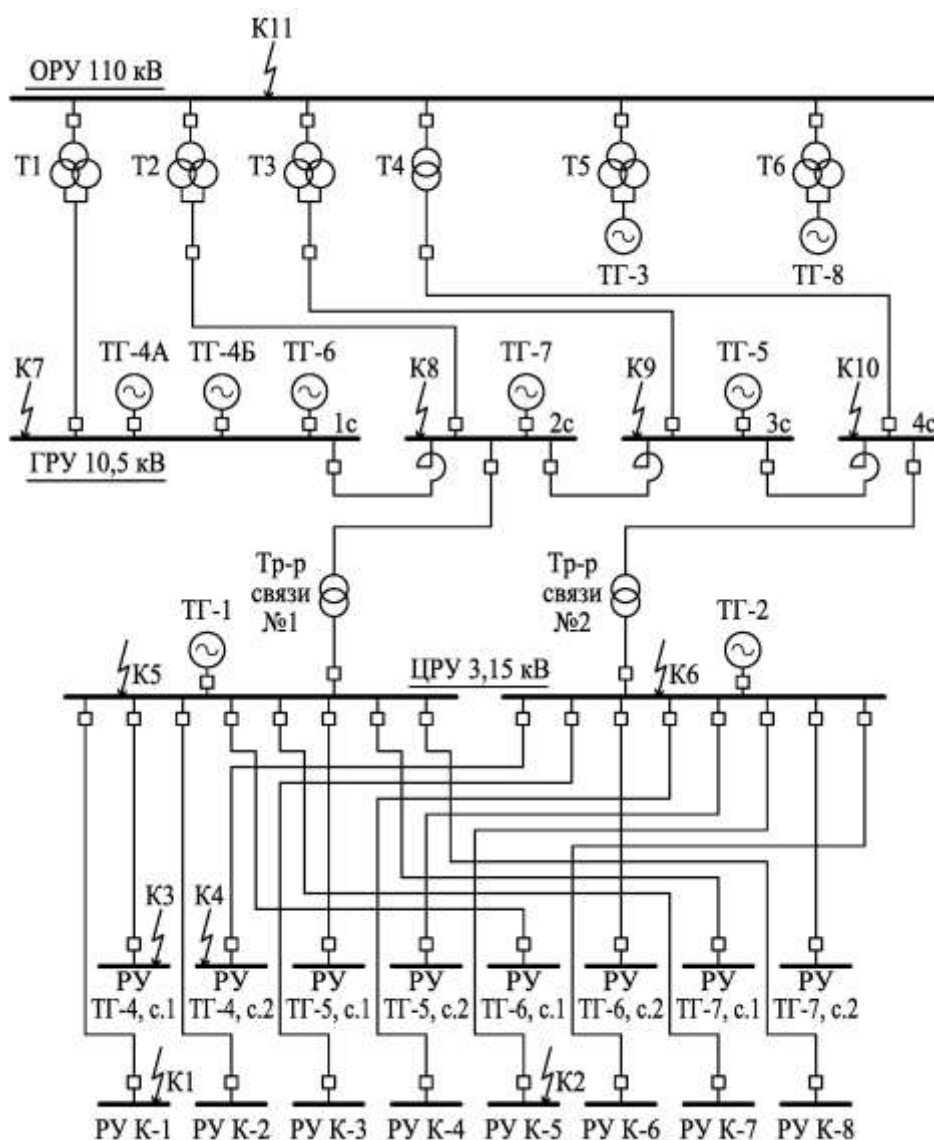


Рис. 2. Моделирование КЗ на секциях шин распределительных устройств ЦЭС

Полученные результаты расчетов приведены в табл. 1.

Как видно из полученных результатов, наибольшее отклонение скольжения асинхронных двигателей возникает при КЗ на ОРУ 110 кВ. При этом степень влияния возмущения не зависит от места КЗ, т.к. потребители оказываются равноудаленными во всех четырех случаях от точки КЗ. Другая картина складывается при моделировании КЗ на секциях шин ГРУ 10,5 кВ. При КЗ на второй и четвертой секциях значение  $\sigma$  получается больше, чем при КЗ на первой и третьей секциях шин. Это объясняется тем, что при секционировании шин подключены реакторы, которые уменьшают токи КЗ, влияющие на скорость торможения ротора асинхронного двигателя. Потребители СН питаются через трансформаторы связи со второй и четвертой секций шин ГРУ 10,5 кВ, что и обусловлено их чувствительностью на КЗ в схеме.

Небольшие возмущения наблюдаются при моделировании КЗ на сборках распределительных устройств котлов и турбогенераторов (точки КЗ К1-К4). Это обусловлено удаленностью КЗ по отношению к потребителям, не запитанным с РУ, на котором произошло КЗ.

При моделировании КЗ в точках К7 и К9 степень

возмущения  $\sigma$  оказалась меньше, чем при КЗ в точках К8 и К10, вследствие наличия реакторов между секциями шин ГРУ.

Таблица 1  
Значения влияния КЗ на потребителей СН

Точки КЗ	Значение влияния возмущения $\sigma$
К1: РУ К-1, 1 секция	0,026
К2: РУ К-5, 1 секция	0,043
К3: РУ ТГ-4, 1 секция	0,021
К4: РУ ТГ-4, 2 секция	0,0209
К5: ЦРУ 3,15 кВ, 1 секция ССШ	0,22257
К6: ЦРУ 3,15 кВ, 3 секция ССШ	0,282
К7: ГРУ 10,5 кВ, 1 секция ССШ	0,00877
К8: ГРУ 10,5 кВ, 2 секция ССШ	0,24778
К9: ГРУ 10,5 кВ, 3 секция ССШ	0,00558
К10: ГРУ 10,5 кВ, 4 секция ССШ	0,342
К11: ОРУ 110 кВ, 1 секция	0,632

На основании полученных результатов выполнен анализ устойчивости механизмов СН. Для этого произведено моделирование КЗ длительностью 2,5 с в точке К8 (рис. 3). Так, объектом исследования является питательный насос ПЭН-6, получающий питание с первой секции РУ К-5, т.к. питательные насосы выполняют главную задачу в технологическом процессе – подачу питательной воды в топку котла. Полученные зависимости скольжения и напряжения от времени приведены на рис. 4, 6.

Для сравнения полученных зависимостей также приведены характеристики (рис. 5, 7), рассчитанные по степенным зависимостям момента от скорости, позволяющим упрощенно определить статический момент сопротивления на валу. При этом, как отмечалось ранее, не учитываются конструктивные параметры механизма и характеристика трубопроводной сети [10, 11], в отличие от полученной в [5] уточненной методики расчета моментно-скоростных характеристик.

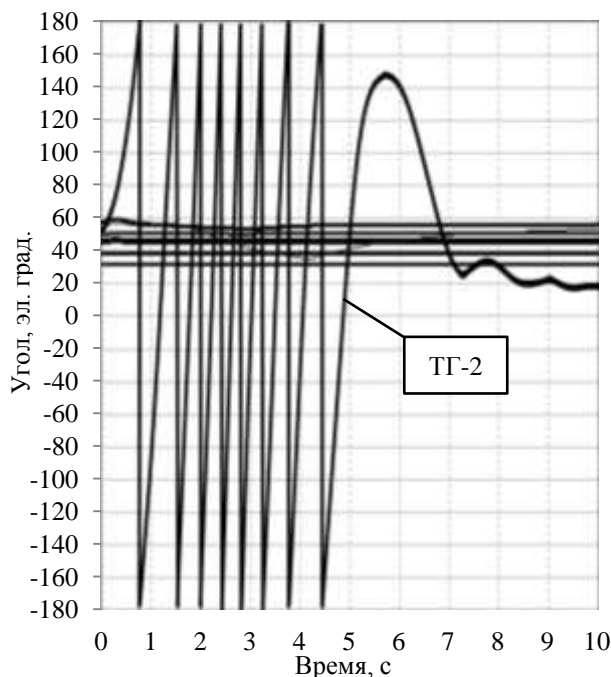


Рис. 3. Собственные углы генераторов при КЗ длительностью 2,5 с на 4-й секции ССШ ЦРУ 3,15 кВ

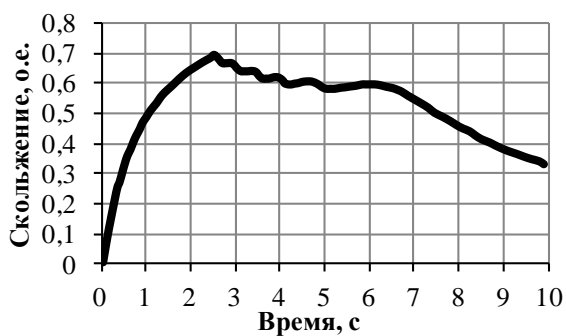


Рис. 4. Зависимость скольжения от времени АД ПЭН-6, полученная по уточненной методике

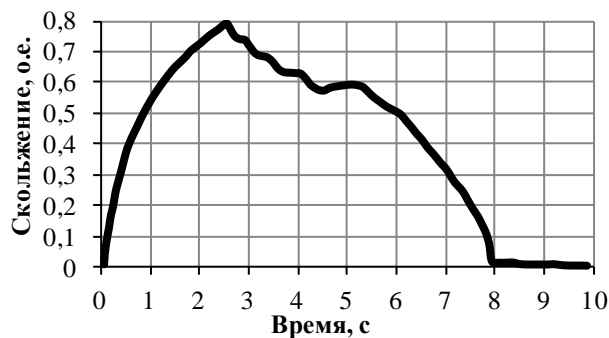


Рис. 5. Зависимость скольжения от времени АД ПЭН-6, полученная по упрощенной методике

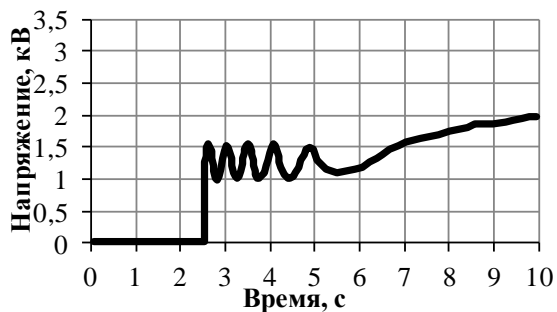


Рис. 6. Зависимость напряжения от времени АД ПЭН-6, полученная по уточненной методике

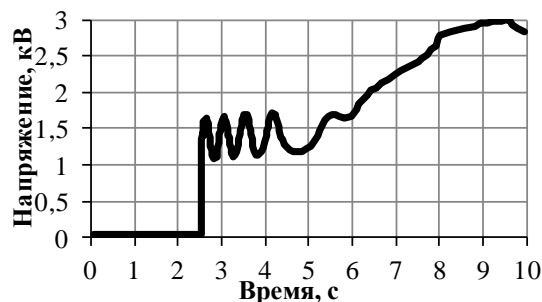


Рис. 7. Зависимость напряжения от времени АД ПЭН-6, полученная по упрощенной методике

Как видно из полученных зависимостей, время, затраченное на восстановление нормального режима работы после отключения КЗ, больше по сравнению с зависимостями, полученными по упрощенной методике. Это обусловлено тем, что при расчете суммарного момента учитываются потери, а также значение противодействия со стороны трубопроводной сети. Отличие максимальных отклонений скольжения, полученных при расчете по разным методикам, составляет 1,3%.

Так как в рамках задачи работы СН исследуется устойчивость основных механизмов СН электростанции, то выполнен расчет электромеханических переходных процессов с учетом этих механизмов. В качестве параметров оценки успешности самозапуска двигателей СН принято время самозапуска и максимальный заброс скольжения приводных двигателей циркуляционного насоса (ЦН-8А), сетевого насоса (СН-8), конденсатного насоса (КН-1Б), дымососа (ДС-5А) и дутьевого вентилятора (ДВ-5А). Результаты расчетов приведены в табл. 2.

В результате на время самозапуска двигателей СН оказывает влияние качания генераторов (см. рис. 3), а успешность самозапуска зависит от динамической устойчивости генераторов. Кроме того, на длительность самозапуска также влияет значение начального статического момента. Малый заброс скольжения двигателя КН-1Б обусловлен удаленностью точки КЗ от секции шин РУ К-1 380В, от которой запитан приводной двигатель конденсатного насоса.

#### АНАЛИЗ РЕЖИМА РАБОТЫ НАСОСА ПРИ НЕИСПРАВНОМ ОБРАТНОМ КЛАПАНЕ

Рассмотрим режим работы питательного насоса ПЭН-6 при открытом обратном клапане. При отключении двигателя от сети скорость вращения вала рабочего колеса насоса начнет снижаться, что приведет к уменьшению подачи, создаваемой напором. При дальнейшем снижении скорости вращения вала насос не будет создавать потока (отсутствие точек пересечения рабочей характеристики насоса с характеристикой сети), но при

этом вращение вала остается таким же, как при насосном режиме. Такой режим принято называть режимом противотока. Для питательных насосов данный режим аналогичен, когда давление в барабане котла больше, чем давление, создаваемое насосом, и вода, выталкиваясь из барабана, стремится раскрутить рабочее колесо насоса в обратную сторону, создавая противодействующий момент. Относительный момент в режиме противотока получен на основе универсальных относительных характеристик обратимых гидромашин.

Таким образом, при расчете переходных процессов при открытом обратном клапане насоса учитывается его работа в режиме противотока, позволяющая оценить успешность самозапуска асинхронного двигателя. Для этого было проведено моделирование КЗ на 1-й секции РУ К-5 3,15 кВ в программном комплексе «КАТРАН», после чего сняты зависимости скорости и тока от времени (см. рис. 7, 9). Также приведены для сравнения зависимости при исправном (закрытом) обратном клапане (рис. 8, 10). Стоит отметить, что в этом случае при срыве подачи противодействие со стороны трубопроводной сети отсутствует, и расчет ведется по квадратичной зависимости момента от скорости.

По полученным зависимостям видно, что в момент времени 0,3 с произошел срыв подачи, и скорость вращения рабочего колеса насоса за счет давления в барабане котла сначала достигла нуля, а затем стала отрицательной до некоторого максимального значения, обусловленного давлением со стороны трубопроводной сети. При закрытом обратном клапане скорость вращения также уменьшилась, но до значения 650 об/мин, из-за отсутствия противодействия со стороны сети.

При отключении КЗ в момент времени 2,5 с наблюдается самозапуск асинхронного двигателя, который является успешным. Максимальный ток самозапуска по отношению к номинальному составляет 3,67, что меньше номинальной кратности пускового тока двигателя, равного 5,3. Время самозапуска при открытом обратном клапане равно 2,8 с, что на 18% больше, чем при закрытом обратном клапане.

Таблица 2

Значения влияния КЗ на потребителей СН

Механизм СН	Время самозапуска, с	Заброс скольжения
ЦН-8А	6,2	0,56
СН-8	6,3	0,54
КН-1Б	6,9	0,048
ДС-5А	6,1	0,56
ДВ-5А	7,0	0,3

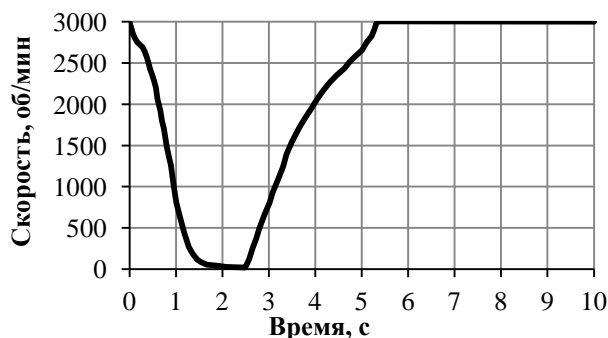


Рис. 8. Зависимость скорости вращения от времени двигателя ПЭН-6 при открытом обратном клапане

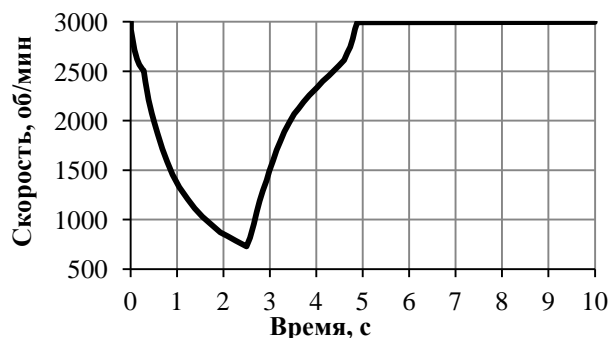


Рис. 9. Зависимость скорости вращения от времени двигателя ПЭН-6 при закрытом обратном клапане

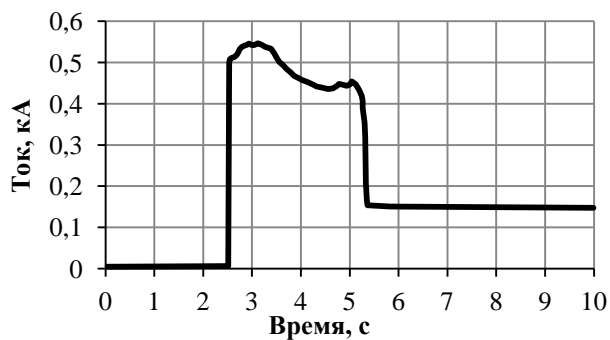


Рис. 10. Зависимость тока от времени двигателя ПЭН-6 при открытом обратном клапане

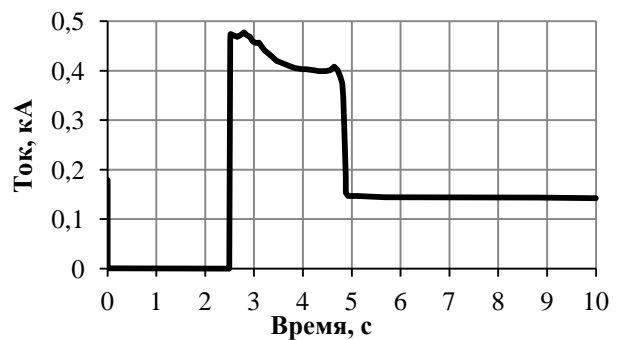


Рис. 11. Зависимость тока от времени двигателя ПЭН-6 при закрытом обратном клапане

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе ранее полученной методики расчета моментно-скоростной характеристики проведен анализ устойчивости механизмов СН теплофикационной электростанции, получены зависимости скольжения от времени, по которым можно определить время выбега асинхронного двигателя и судить об успешности самозапуска механизма. Использование уточненных уравнений позволяет снизить погрешность определения времени выбега приводного механизма. Разработанная методика была интегрирована в программное обеспечение «КАТРАН», где был проведен анализ успешности самозапуска двигателей СН при аварийных ситуациях в сети, выявлены сенсорные элементы схемы, а также исследован процесс выбега асинхронного двигателя при открытом и закрытом обратном клапане насоса.

В результате выявления сенсорных элементов схемы установлено, что механизмы принимают наибольшее возмущение при КЗ на секциях шин 110 кВ (значения степени отклонения параметров режима  $\sigma$  достигает максимального значения, равного 0,632), при этом нарушается динамическая устойчивость генератора ТГ-2. Результаты расчетов позволяют более точно отстроить уставки релейной и технологической защит, установленных на станции, для более надежной работы основного и вспомогательного технологического оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Георгиади В.Х., Курбаналиев У.К., Соколов В.Л. Анализ методов расчета режимов самозапуска электродвигателей собственных нужд электростанции // Электрические станции. 1987. №5. С.31-34.
2. Георгиади В.Х. Упрощенный расчет режима группового выбега электродвигателей // Промышленная энергетика.

1985. №5. С.42-45.

3. Малафеев А.В., Долганова А.С., Газизова О.В. Анализ устойчивости двигателей собственных нужд электростанций ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Главный энергетик. 2012. №10. С.40-46.
4. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем / О.Н. Войтов, Н.И. Воропай, А.З. Гамм и др. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. 256 с.: ил.
5. Малафеев А.В., Трemasов М.А. Разработка уточненной методики расчета моментно-скоростной характеристики питательного насоса тепловой электростанции в задаче анализа устойчивости собственных нужд // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №3. С.58-63.
6. Pfleiderer C. Strömungsmaschinen. Springer 1952, p. 249.
7. Малафеев А.В., Трemasов М.А. Аналитическое определение моментно-скоростных характеристик дутьевого вентилятора теплофикационной электростанции // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: материалы 17-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и специалистов. Магнитогорск, 2016. С. 144-147.
8. Аршеневский Н.Н. Обратимые гидромашины гидроаккумулирующих электростанций. М.: Энергия, 1977. 240 с.: ил.
9. Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Способ представления асинхронных двигателей при расчете переходных режимов короткого замыкания с целью анализа влияния тока подпитки на динамическую устойчивость // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2008. №13. С.43-45.
10. Юлдашева А.И., Малафеев А.В. Учет показателей надежности при планировании режима промышленной системы электроснабжения с собственными электростанциями // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 3 (28). С. 36-40.
11. Малафеев А.В., Буланова О.В., Ахметханов А.М. Исследование статической устойчивости синхронных двигателей в условиях системы электроснабжения ОАО «ММК» при параллельной работе с энергосистемой // Электротехнические системы и комплексы. 2010. № 1. С. 32-35.

Поступила в редакцию 15 июня 2016 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

#### ANALYSIS OF AUXILIARY MOTOR STABILITY AT HEAT POWER PLANTS TAKING INTO ACCOUNT CHARACTERISTICS OF DRIVE MECHANISMS

Aleksey V. Malafeev

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Industrial Electric Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Maksim A. Tremasov

Engineer, Electrical Engineering Department, "Magnitogorsk Giprometz" JSC, Magnitogorsk, Russia.

The paper analyzes the stability of driving mechanisms of auxiliary induction motors of thermal power plant. The calculation takes into account operating (pressure) characteristics of pumps and draft equipment, as well as the characteristics of the pipeline networks needed to determine the mechanisms of torque-speed characteristics. The resulting method of calculation was integrated into the software "KATRAN", where the calculation of transients is based on the method of successive intervals taking into account the adjusted analysis depending on the time of the machine operating speed. Modeling emergency operation makes it possible to determine the success of the self-start of auxiliary generators and motors to meet the needs of the plant. On the basis of the simulated emergency operation we found sensory elements in the scheme assessing the stability of auxiliary generators and motors. The developed method can be used to select the parameters of operation of relay protection and technological systems of auxiliary needs of thermal power for more reliable operation of the main and auxiliary process equipment.

**Keywords:** Station auxiliaries, feed pumps, operating characteristics, characteristics of the pipe network, torque-speed characteristics, dynamic stability, self-starting motor, sensory.

#### REFERENCES

- Georgiadi V.Kh., Kurbangaliev U.K., Sokolov V.L. Analysis of Methods of Calculation of Self-starting Modes for Motors of Auxiliary Power Needs. *Elektricheskie stantsii* [Electric power plants], 1987, no. 5, pp. 31-34. (In Russian)
- Georgiadi V.Kh. Simplified Calculation of Motor Rundown Mode. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 1985, no 5, pp. 42-45. (In Russian)
- Malafeev A.V., Dolganova A.S., Gazizova O.V. Stability Analysis of Motors of Auxiliary Power Plants at JSC "MMK". *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2012, no. 10, pp. 40-46. (In Russian)
- Voytov O.N., Voropay N.I., Gamm A.Z. et al. Analysis of Irregularities in Electric Power Systems. Novosibirsk, Nauka. Sibirskaya izdatelskaya firma RAN Publ., 1999. 256 p.
- Malafeev A.V., Tremasov M.A. Development of Updated Methodology for Calculating Torque-Speed Characteristics of Thermal Power Plant Feed Pump in The Problem of Auxiliary Power Stability Analysis. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2014, no. 3, pp. 58-63. (In Russian)
- Pfleiderer C. *Strömungsmaschinen*. Springer 1952, p. 249.
- Malafeev A.V., Tremasov M.A. Analytical Determination of Torque-speed Characteristics of Blower Fan of Thermal Power Plant. *Energetiki i metallurgii nastoyashchemu i budushchemu Rossii: materialy 17-y Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i spetsialistov* [Proc. of 17<sup>th</sup> scientific conference "Power Engineers and Metallurgists to the Present and the Future of Russia"], 2016, pp. 144-147. (In Russian)
- Arshenevskiy N.N. *Obratimye gidromashiny gidroakkumuliruyushchikh elektrostantsiy* [Reversible Hydraulic Pump Storage Power Plants]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 240 p.
- Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Method of Presentation of Asynchronous Motors in Calculation of Transient Modes of Short Circuit in Order to Analyze Current Make-up Effect on Dynamic Stability. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozemya* [News of Black Earth Belt Higher Education Institutions], 2008, no.13, pp.43-45. (In Russian)
- Yuldasheva A.I., Malafeev A.V. Accounting the reliability index at planning the mode of industrial power supply system with own electric power stations. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2015, no. 3, pp. 36-40. (In Russian)
- Malafeev A.V., Bulanova O.V., Akhmetkhanov A.M. Research of static stability of synchronous motor in electric power supply system of MMK OJSC. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2010, no. 1, pp. 32-35. (In Russian)

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

Malafeev A.V., Tremasov M.A. Analysis of Auxiliary Motor Stability at Heat Power Plants Taking Into Account Characteristics of Drive Mechanisms. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp.6-13. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-6-13