

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.3.07

## Способ управления током возбуждения как средство обеспечения устойчивости работы синхронного двигателя

А.Л. Жеребцов<sup>1</sup>, В.Ю. Чуйков<sup>2</sup>, А.А. Шулпин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО «Газпром трансгаз Сургут», г. Сургут, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО НТЦ «Промышленная энергетика», г. Иваново, Российская Федерация

<sup>3</sup> ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: promenergo@ivpromenergo.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Использование мощных синхронных двигателей в узлах нагрузки предъявляет особые требования к повышению устойчивости работы, а также к системам автоматического регулирования возбуждения. Разработаны и используются способы повышения устойчивости синхронных двигателей за счет обеспечения быстрого действия автоматического регулирования возбуждения в аварийных режимах и регулирования напряжения возбуждения. Однако данные способы не учитывают возможности перерегулирования при снижении тока возбуждения после режима форсировки и выхода синхронных двигателей из синхронизма. В связи с этим актуальной задачей является разработка алгоритма, исключающего режим перерегулирования, и способа управления током возбуждения синхронных двигателей.

**Материалы и методы:** В процессе исследования использованы методы математического моделирования с использованием дифференциальных уравнений, реализованных в программно-техническом комплексе Simulink (MatLAB). При разработке математической модели сделаны допущения: отсутствие насыщения магнитных цепей, потерь в стали и вытеснения тока в обмотках, синусоидальное распределение в пространстве магнитных индукций, независимость индуктивных сопротивлений рассеяния для синхронных двигателей, постоянство параметров трансформаторов при внешних воздействиях на магнитные поля; представление внешней питающей сети источником бесконечной мощности.

**Результаты:** В отличие от известных способов регулирования, разработан алгоритм, исключающий эффект перерегулирования, и реализован способ управления током возбуждения синхронных двигателей с регулируемой скоростью развозбуждения и контролем угла нагрузки синхронных двигателей в послеаварийных режимах. Получены численные решения и выполнен их анализ. Достоверность результатов, полученных с использованием математического моделирования, подтверждена экспериментальными данными.

**Выводы:** Разработанный способ управления током возбуждения синхронных двигателей позволяет повысить устойчивость их работы в послеаварийных режимах при минимальных потерях в статоре и предотвращении перегрева ротора. Предложенный способ управления током возбуждения синхронных двигателей, исключающий эффект перерегулирования, обеспечивает решение практической задачи повышения устойчивости работы мощных синхронных двигателей.

**Ключевые слова:** системам автоматического регулирования возбуждения, синхронный двигатель, режим форсировки, ток возбуждения, эффект перерегулирования управления током возбуждения синхронных двигателей.

## A method for controlling the excitation current as a means of ensuring stability of synchronous motor operation

A.L. Zherebtsov<sup>1</sup>, V.Yu. Chuikov<sup>2</sup>, A.A. Shulpin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Gazprom Transgaz Surgut, Surgut, Russian Federation,

<sup>2</sup> OOO Scientific and Technical Centre «Industrial Power Engineering», Ivanovo, Russian Federation

<sup>3</sup> Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: promenergo@ivpromenergo.ru

### Abstract

**Background:** The use of powerful synchronous engines (SE) in load nodes makes special requirements for increasing of operation stability, and for the systems of automatic excitation regulation (AER). The existing methods increase the SE stability by ensuring a quick response of the AER system in emergency modes and by regulating the excitation voltage.

However, these methods do not take into account the possibility of over-shoot with a decrease in the excitation current after the forcing mode and the loss of synchronism in the SE. All this makes it urgent to develop an algorithm excluding the overshoot mode and a method of SE excitation current control.

**Materials and methods:** The study employed methods of mathematical modeling with differential equations implemented in the software-technical complex Simulink (MatLAB). In the development of the mathematical model we made the following assumptions about: the absence of the saturation of the magnetic circuits, iron losses and current displacement in the winding; the sinusoidal distribution in the magnetic induction space; the independence of the inductive resistances of the dissipation for SEs, the constant values of transformer parameters under external influence on magnetic fields; the presentation of the external power line as a source of endless power.

**Results:** Unlike the known regulation methods, the designed algorithm excludes the overshoot effect, and realizes the method of excitation current management in SEs with controlled deexcitation speed and load angle control in SEs in post-emergency modes. We have obtained numerical solutions and analyzed them. The validity of the results obtained by mathematical modeling has been confirmed by experimental data.

**Conclusions:** The developed method of SE excitation current control improves the stability of SE operation in post-emergency modes with minimum losses in the stator and prevents rotor overheat. The proposed method of SE excitation current management excluding the overshoot effect solves the practical problem of increasing the operation stability of powerful SEs.

**Key words:** automatic excitation regulation system, synchronous engine, forcing mode, excitation current, effect of synchronous engine excitation current control overshoot.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.2.021-031

**Введение.** Мощные синхронные двигатели (СД) в силу ряда технико-экономических преимуществ широко используются для привода различных механизмов в различных промышленных отраслях, в том числе и в газовой отрасли в качестве электропривода нагнетателей газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА).

При эксплуатации СД имеется возможность перехода синхронной машины в асинхронный режим работы вследствие нарушения статической или динамической устойчивости. Основными причинами нарушения статической (динамической) устойчивости являются большие набросы момента на валу и глубокие посадки напряжения.

Важную роль в сохранении устойчивости играет быстрдействие релейной защиты и систем АВВ СД.

В зависимости от схемы питающей сети, схемы узла нагрузки и режимов работы синхронных двигателей регулирование их возбуждения может осуществляться в зависимости от изменения следующих параметров [1]:

- 1) напряжения в узле нагрузки ( $U_{ш} = \text{const}$ );
- 2) тока статора или внутреннего угла  $\delta$  и их производных;
- 3) нескольких параметров при одновременном (или селективном по времени) воздействии сигналов управления на обмотку возбуждения двигателей;
- 4) реактивной мощности  $Q_{дв}$ , отдаваемой двигателем, с поддержанием  $Q_{дв} = \text{const}$  (постоянство отдачи  $Q_{дв}$ );
- 5) коэффициента мощности ( $\cos\varphi = \text{const}$ ).

Выбор того или иного способа управления зависит от характера нагрузки двигателя и качественных показателей сети электроснабжения. При относительно стабильной нагрузке и наличии колебаний напряжения или мощности питающей сети предпочтение отдается способу управления по отклонению напряжения на шинах статора, при переменной нагруз-

ке с амплитудой, близкой к номинальной мощности двигателя, – по углу нагрузки, а при недогруженном двигателе – более экономичным оказывается управление по отклонению  $\cos\varphi$  двигателя от единицы [2–6].

Однако данные способы не учитывают возможности перерегулирования при снижении тока возбуждения регулятором после режима форсировки и вероятности выхода СД из синхронизма.

При изменении нагрузки в пределах статической устойчивости, т. е. при углах нагрузки  $\delta$ , меньших  $70\text{--}90^\circ$ , можно считать параметры  $\delta$  и активного тока  $I_a$  эквивалентными для регулирования. При нагрузках за пределом статической устойчивости активный ток будет уменьшаться, в то время как необходимо увеличивать ток возбуждения. В этих режимах, возникающих при пониженном возбуждении, регулирование по углу нагрузки  $\delta$  оказывается более эффективным. Регулирование по  $\cos\varphi$  менее целесообразно (чем изменение реактивной мощности) ввиду меньшего относительного изменения угла  $\varphi$ , и трудно достичь необходимой точности для обеспечения эффективности регулирования [7].

На объектах газовой промышленности установлено значительное количество устройств АВВ с цифровым управлением типа ВТЦ-СД. Основной режим регулирования возбуждения ВТЦ-СД реализует совместную работу двух контуров: контура обеспечения динамической устойчивости двигателя по изменению напряжения статора и контура регулирования по коэффициенту мощности ( $\cos\varphi$ ) [8].

На компрессорных станциях (КС) находят применение полнонапорные и неполнонапорные центробежные нагнетатели. Схемы обвязки неполнонапорных нагнетателей приведены на рис. 1.

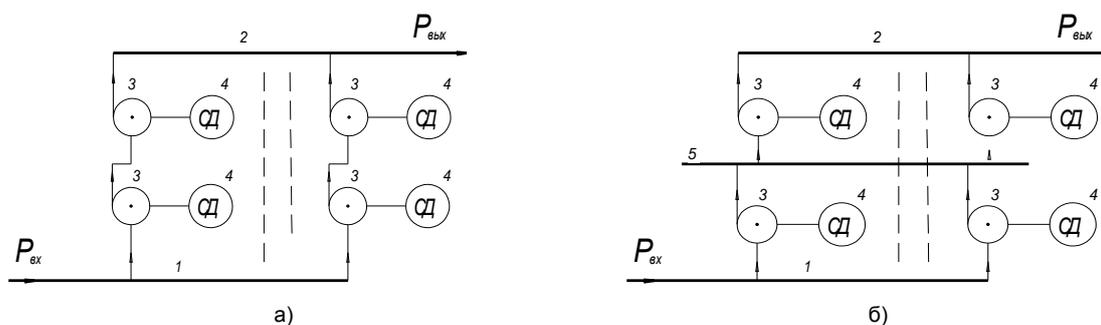


Рис. 1. Схемы работы синхронного электродвигателя СТД-12500 с неполнонапорными нагнетателями: а – смешанная схема; б – коллекторная схема; 1 – входной трубопровод; 2 – выходной трубопровод; 3 – неполнонапорный нагнетатель; 4 – синхронный электродвигатель СТД-12500; 5 – коллектор

Для получения необходимой степени сжатия газа в этих схемах газ после выхода из одного нагнетателя сразу же поступает на вход другого нагнетателя (рис. 1,а) либо на коллектор (рис. 1,б).

Необходимый расход газа через КС при смешанной схеме достигается параллельной работой нескольких групп ГПА. При остановке в группе одного неполнонапорного ГПА требуется вывести в режим «кольцо» и второй агрегат.

Работа СД в группе несет определенные риски, а именно: при малейшем воздействии возмущающих факторов (просадка напряжения, резкий перепад давления и т. п.) один из СД группы влияет на устойчивость работы другого.

При определенных ситуациях воздействия любого из возмущающих факторов это приводит к взаимному раскачиванию СД с возможным выходом из режима синхронизма и их останову. Также одной из причин самораскачивания СД может стать неудачный выбор закона регулирования возбуждения или коэффициентов усиления по отдельным каналам регулирования [9].

**Методы исследования.** Для удержания СД в синхронизме в случаях снижения напряжения ниже допустимого значения в возбуждательном устройстве предусмотрен режим форсировки, обеспечивающий мгновенное увеличение тока ротора выше номинального. При этом имеется возможность перерегулирования при снижении тока возбуждения регулятором после режима форсировки и вероятность выхода СД из синхронизма.

Согласно ГОСТ 24688-81<sup>1</sup>, возбудители должны обеспечивать форсировку возбуждения кратностью не менее 1,4 номинального тока возбуждения при пониженном до 0,8 номинальном напряжении питающей сети возбудителя или 1,75 – при номинальном напряжении сети.

В момент снижения напряжения происходит мгновенный рост тока статора, угол

между током и напряжением статора становится отличным от нуля, синхронный двигатель оказывается недо возбужденным и наступает вероятность выхода из синхронизма. ПИД-регулятор возбудителя не всегда в состоянии быстро отреагировать на протекание указанного процесса, поэтому в таких случаях форсировка является единственным способом сохранить устойчивость и предотвратить аварийный останов СД.

Еще одно условие включения режима форсировки наступает при возникновении перегрузки на валу ротора синхронного двигателя. Изменение тока возбуждения отстает от изменения напряжения, приложенного к обмотке ротора. Поэтому расфорсировка при глубоком снижении напряжения может привести к тому, что в послеаварийный период, когда угол нагрузки  $\delta$  по инерции еще продолжает увеличиваться, ток возбуждения не успеет достаточно возрасти и форсировочная способность двигателя после аварийного режима, например КЗ, фактически не будет использована полностью [9].

Для управления током возбуждения производители возбудителей в программное обеспечение закладывают математическую функцию, которая описывает принцип работы ПИД-регулятора. В общем случае формула выходного сигнала ПИД-регулятора выглядит следующим образом:

$$U(t) = P + I + D = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  – пропорциональный коэффициент (безразмерный), постоянная интегрирования (размерность времени) и постоянная дифференцирования (размерность времени) регулятора.

Подобрав коэффициенты  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ , можно оптимизировать качество работы регулятора: уменьшить время выхода на задание; снизить влияние внешних возмущений; уменьшить отклонение от задания. При очень большой величине  $T_i$  регулятор медленно выводит объект на задание. При малом  $T_i$  происходит перерегулирование, т.е. регулируемый параметр  $X$  проскакивает задание, а затем сходится к нему.

<sup>1</sup> ГОСТ 24688-81. Возбудители статические полупроводниковые для трехфазных синхронных двигателей. Общие технические требования.

Одним из требований в отношении динамических характеристик систем автоматического регулирования (САР) является требование к качеству переходного процесса. Прямыми показателями качества переходного процесса являются перерегулирование, время регулирования, колебательность процесса, установившаяся ошибка, характер затухания переходного процесса, которые определяются по кривой  $h(t)$  (рис. 2,а) [10].

На рис. 2,б показаны характеристики переходного процесса устойчивой системы автоматического регулирования при изменении уставки регулятора, т.е. при таком воздействии, когда регулируемая величина должна прийти к своему новому заданному значению.

Колебательный переходный процесс (рис. 2,б, кривая 1) по техническим условиям иногда может оказаться недопустимым. В таких случаях следует настраивать систему на апериодический переходный процесс (рис. 2,б, кривые 2, 3). В то же время, несмотря на колебательность переходного процесса, быстродействие такой системы может быть выше, чем у апериодически настроенной САР

При снижении тока возбуждения ПИД-регулятором после режима форсировки может происходить перерегулирование, при котором  $\cos\varphi$  существенно смещается в индуктивную зону, что сказывается на устойчивости работы СД, а при воздействии дополнительного возмущающего фактора может произойти аварийный останов СД (например, наброс нагрузки при снижении напряжения).

С помощью специализированного программного обеспечения цифровых возбудителей ВТЦ-СД сняты осциллограммы режима форсировки СД с различной нагрузкой на валу. На рис. 3 представлены осциллограммы реально действующих возбудителей. Перерегулирование тока возбуждения возникает после отключения режима форсировки.

На рис. 3,в, где СД наиболее загружен (ток возбуждения 300 А), посадка напряжения спровоцировала аварийный останов СД, а где

СД менее загружен (180 А), практически отсутствует перерегулирование.

Таким образом, чем выше нагрузка СД, тем больше величина перерегулирования и, соответственно, вероятность аварийного останова СД.

В послеаварийных режимах в энергосистеме двигатель находится в зоне неустойчивой работы (угол нагрузки двигателя выходит за  $\delta_{\max}$ ) и возврат в зону устойчивой работы может обеспечиваться воздействием на ток возбуждения контуром управления по углу нагрузки машины. Данное превышение угла нагрузки  $\delta_{\max}$  обычно имеет кратковременный характер, но при загруженной машине может привести к выходу СД из синхронизма.

Для предотвращения сваливания СД в асинхронный режим необходимо снижать ток возбуждения при выходе из форсировочного режима. Способы реализации данной задачи следующие:

- ввести новый параметр – скорость закрытия тиристоров (гр. элек/сек) до значения, при котором  $\cos\varphi = 1$  (включается ПИД-регулятор);

- запомнить значение угла открытия тиристоров, при котором в последний раз  $\cos\varphi = 1$ , и по окончании форсировки открыть тиристоры именно на этот угол;

- поднять уставку «напряжение 10 кВ отключение форсировки» с 9,8 до 10 или 10,2 кВ, что позволит увеличить время форсировки, а значит, и время на стабилизацию параметров СТД;

- поднять уставку «напряжение 10 кВ отключение форсировки» с 9,8 до 10,9–11 кВ, что позволит отключить уставку выхода из форсировки по напряжению, а форсировка будет заканчиваться через положенные 8 с;

- изменить параметры ПИД-регулятора.

Для реализации данной задачи необходимо провести экспериментальные исследования на действующем оборудовании либо воспроизвести представленные способы реализации задачи на математической модели.

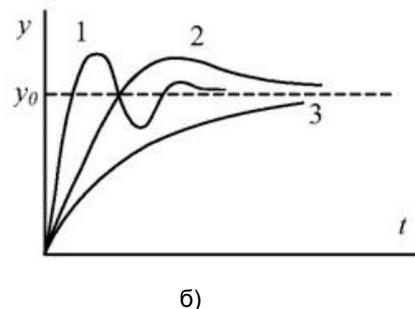
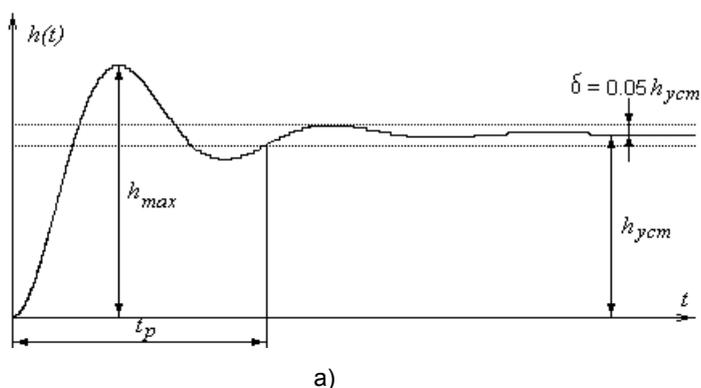


Рис. 2. Переходные режимы и показатели качества САР: а – определение показателей качества (перерегулирование, время регулирования, установившаяся ошибка); б – переходные процессы САР

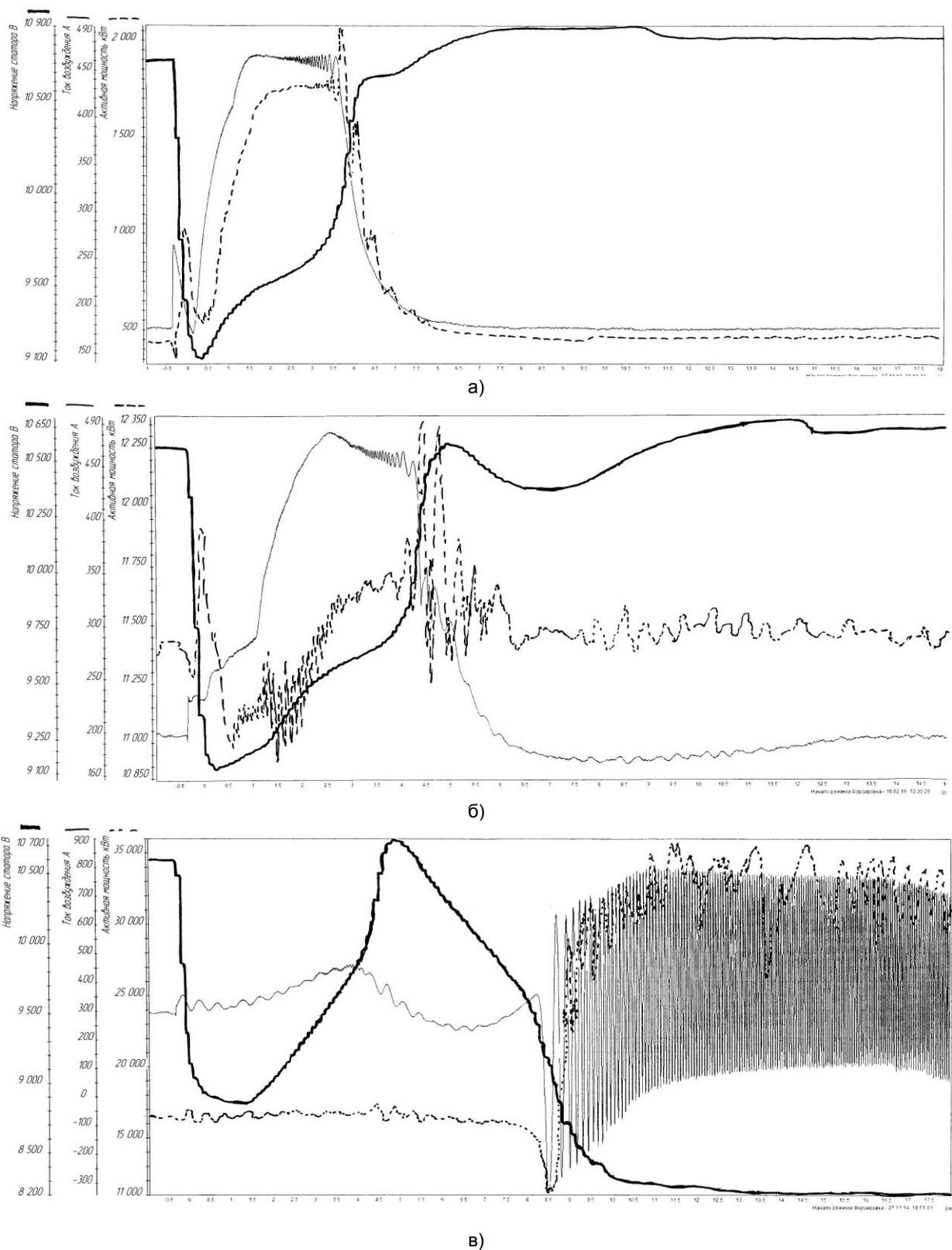


Рис. 3. Осциллограммы режима форсировки СД с различной нагрузкой на валу: а – начальный ток возбуждения 180 А (перерегулирования нет); б – начальный ток возбуждения 200 А (небольшое перерегулирование, около 20 А); в – начальный ток возбуждения 300 А (значительное перерегулирование, асинхронный ход)

Изменение существующих настроек ПИД-регулятора для предотвращения подобных ситуаций возможно, но в таком случае могут возникнуть аварийные ситуации при существующих безаварийных режимах. Если настроить ПИД-регулятор «быстрее» для

быстрого подъема тока возбуждения и его снижения, то это может привести к неустойчивой работе и «раскачиванию» в других режимах. Если настроить ПИД-регулятор «медленнее», то он может не справиться с резкими изменениями нагрузки на валу ротора, что

встречается довольно часто при загрузке ЭГПА.

**Математическая модель.** Для анализа эффективности функционирования и определения оптимальных параметров ПИД-регулятора с использованием дифференциальных уравнений была разработана математическая модель системы электроснабжения компрессорного цеха в составе ЭГПА-12,5 МВт с неполнонапорными магнететалями [11].

Разработаны математические модели трансформатора ТРДЦН-63000 220/10/10 кВ, синхронного двигателя STD-12500, тиристорного возбудителя и системы управления возбуждением.

При этом был сделан ряд допущений:

1) для СД:

– используются уравнения Парка-Горева, полученные для идеализированной машины, при этом не учитывается зависимость параметров двигателей от их режима;

– не учитывается магнитное насыщение СД;

– в воздушном зазоре машины действуют намагничивающие силы только первой гармоника;

– не учитываются потери на перемагничивание;

– считается, что обмотки статора выполнены симметрично, а ротор двигателя симметричен относительно осей  $d$  и  $q$ ;

– индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве;

2) для трансформаторов считается, что их параметры постоянны и не изменяются при внешних воздействиях (напряжений, токов нагрузки и т.д.) на магнитные поля;

3) для внешней питающей сети считается, что трансформатор с расщепленной обмоткой в узле нагрузки КС питается от источника бесконечной мощности.

Ядро системы моделирования разработано в среде MatLAB, в которой реализованы все возможности применяемых математических соотношений и с необходимой детализацией учтены параметры элементов, внешних воздействий и команд микропроцессорной системы управления. Для воспроизведения результатов численных экспериментов использовано приложение Simulink.

Несмотря на сделанные допущения, результаты, полученные с использованием разработанной математической модели, совпадают в пределах точности определения исходных данных с экспериментальными данными, полученными на действующем оборудовании КС в реальной системе электроснабжения.

**Результаты исследования.** Разработанные математические модели позволяют воспроизвести работу компрессорного цеха с двумя электроприводами, подключенными к

одной или двум секциям вторичной обмотки трансформатора ТРДЦН-63000 220/10/10 кВ.

Полученная математическая модель позволяет: воспроизводить провалы напряжения на шинах и анализировать параметры провала по степени опасности нарушения работоспособности агрегата; находить возможности воздействия со стороны системы возбуждения; исследовать работу в установившихся и переходных процессах для оценки статической и динамической устойчивости; оценить взаимное влияние электроприводов в различных режимах их работы.

Известен способ управления током возбуждения СД, рассмотренный в [12] и в настоящее время успешно применяющийся в современных цифровых возбудителях типа ВТЦ-СД (производитель ОАО «НИПОМ»). На объектах газовой промышленности цифровые возбудители типа ВТЦ-СД получили широкое распространение. Однако при эксплуатации цифровых возбудителей ВТЦ-СД на КС с неполнонапорными магнететалями выявлены недостатки применяемого способа управления током возбуждения СД, а именно, сваливание СД в асинхронный ход при выходе из форсировочного режима. Поэтому принятый за основу данный способ управления током возбуждения требует усовершенствования для работающих в послеаварийных режимах СД.

В процессе проведения численных экспериментов на математической модели был разработан способ управления током возбуждения СД с регулируемой скоростью развозбуждения и контролем диапазона угла нагрузки СД в послеаварийных процессах.

Разработанный и реализованный на производственных объектах способ управления током возбуждения в послеаварийных режимах обеспечивает минимальные потери энергии в двигателе, повышение динамической и статической устойчивости синхронного режима его работы и повышение точности ограничения максимального тока возбуждения по условию предотвращения перегрева ротора.

Суть указанного способа заключается в том, что плавным уменьшением тока возбуждения (с фиксированным шагом и заданной скоростью) в процессе восстановления параметров энергосистемы после аварийных процессов исключается выход двигателя в зону неустойчивой работы, при этом осуществляется контроль угла нагрузки и коэффициента мощности двигателя для воздействия на ток возбуждения соответствующим контуром управления. Ток возбуждения уменьшается со значения тока форсировки возбуждения до момента, пока  $\cos\varphi$  двигателя не войдет в заданный диапазон ( $\cos\varphi_{зад} \pm \Delta$ ) и значение тока возбуждения не войдет в заданный диапазон ( $I_{fmax}, I_{fmin}$ ), при этом воздействие на ток возбуждения происходит изменением уставки

напряжения статорной цепи на входе регулятора напряжения, при этом реализуется соподчиненный принцип регулирования.

Уставка коэффициента плавного снижения тока возбуждения «Delta COS форсировка» задается в о.е. от 1 до 50. При этом «50» – это в три раза быстрее, чем если бы измеренное значение  $\cos\varphi$  было за границей «m\_K\_cos\_3» (0,15 – значение по умолчанию). Соответственно, «1» – минимальное значение и максимальное время снижения тока возбуждения. Рекомендуемое значение «15–20».

Уставка диапазона входа в значение  $\cos\varphi$  «Допуск COSφ выхода форс» задается в о.е. в диапазоне  $\pm (0,01-0,1)$ .

После входа параметров  $\cos\varphi$ , тока возбуждения в границы вышеуказанных диапазонов значение угла нагрузки  $\delta$  находится в заданном диапазоне ( $\delta_{\min}$ ,  $\delta_{\max}$ ) и воздействие на ток возбуждения производится контуром по отклонению напряжения статорной цепи, при этом уставкой регулятора напряжения статора управляет третий, вспомогательный регулятор,

который, удерживая величину  $\cos\varphi$  двигателя вблизи единицы, обеспечивает минимизацию потерь в статорной цепи.

Контур управления по напряжению статора содержит четвертый, вспомогательный регулятор плавного снижения тока возбуждения, который формирует уставку напряжения для регулятора напряжения только в послеаварийных процессах энергосистемы. Соподчиненное построение данного регулятора с регулятором напряжения обеспечивает безударные переходы управления между третьим и четвертым вспомогательными регуляторами. Схема устройства с регулируемой скоростью развозбуждения приведена на рис. 4.

Одним из основных элементов, определяющих наличие либо отсутствие условий включения регулятора плавного снижения тока возбуждения, является блок вычисления снижения тока возбуждения 27 (рис. 4). На рис. 5 приведен алгоритм работы блока 27 вычисления снижения тока возбуждения.

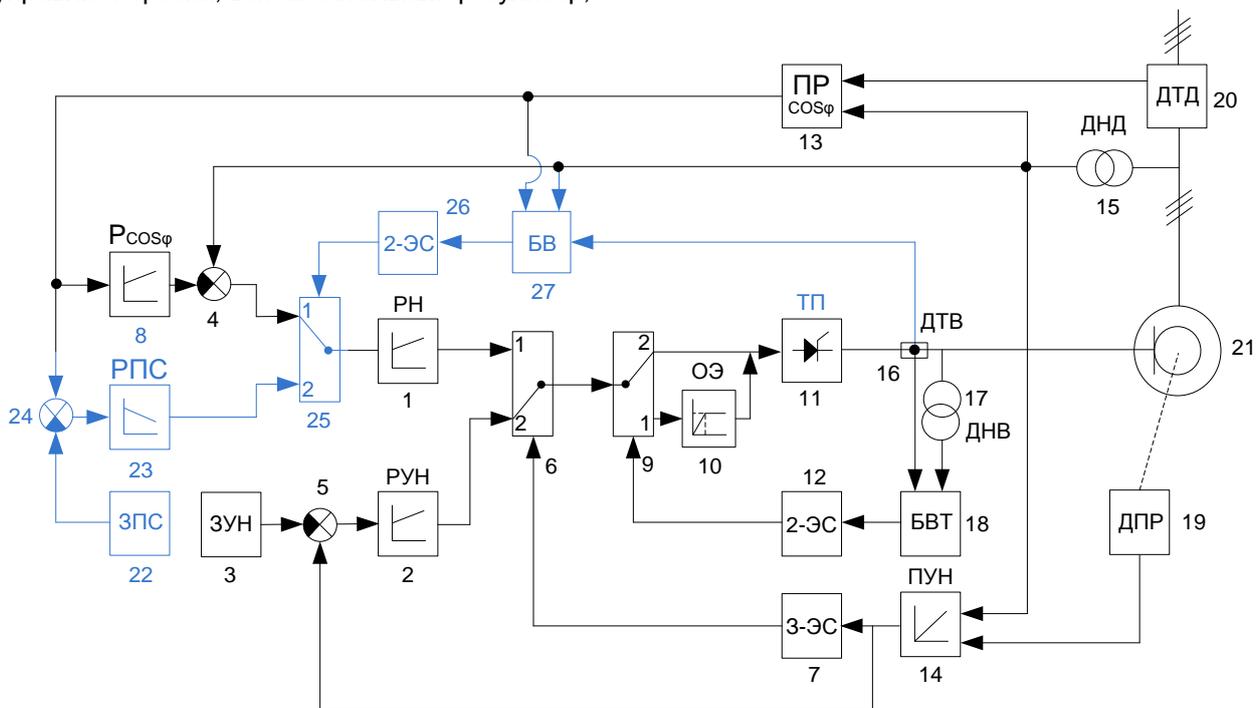
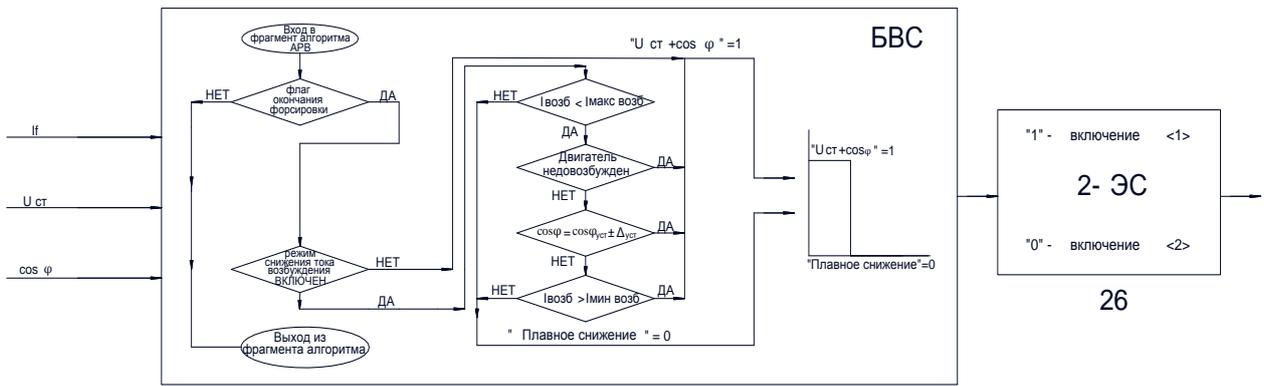


Рис. 4. Схема устройства с регулируемой скоростью развозбуждения и контролем диапазона угла нагрузки электродвигателя: 1 – регулятор контура управления током возбуждения по отклонению напряжения статора (РН); 2 – регулятор угла нагрузки двигателя (РУН); 3 – задатчик угла нагрузки (ЗУН); 4 – вычитающий элемент; 5 – вычитающий элемент; 6 – переключающий элемент; 7 – трехпозиционный элемент сравнения (3-ЭС); 8 – регулятор изменения  $\cos\varphi$  ( $P \cos\varphi$ ); 9 – переключающий элемент; 10 – ограничивающий элемент (ОЭ); 11 – тиристорный возбудитель (ТП); 12 – элемент сравнения (2-ЭС); 13 – преобразователь  $\cos$  двигателя (ПР  $\cos\varphi$ ); 14 – преобразователь угла нагрузки (ПУН); 15 – датчик напряжения статора (ДНД); 16 – датчик тока возбуждения  $I_f$  (ДТВ); 17 – датчик напряжения возбуждения  $U_f$  (ДНВ); 18 – вычислительный блок расчета текущего значения температуры обмотки ротора (БВТ); 19 – датчик положения вектора магнитного момента ротора (ДПР); 20 – датчик тока статора (ДТД); 21 – синхронный двигатель; 22 – задатчик плавного снижения тока возбуждения (ЗПС); 23 – регулятор плавного снижения тока возбуждения (РПС); 24 – вычитающий элемент; 25 – переключающий элемент; 26 – четырехпозиционный элемент сравнения (2-ЭС); 27 – блок вычисления снижения тока возбуждения (БВ)



27

Рис. 5. Алгоритм работы блока 27 вычисления снижения тока возбуждения

После окончания режима форсировки снижение тока возбуждения происходит с постоянной скоростью, определяемой уставкой «Delta COS форсировка», регулятор 23 (рис. 4) уменьшает ток возбуждения, при этом:

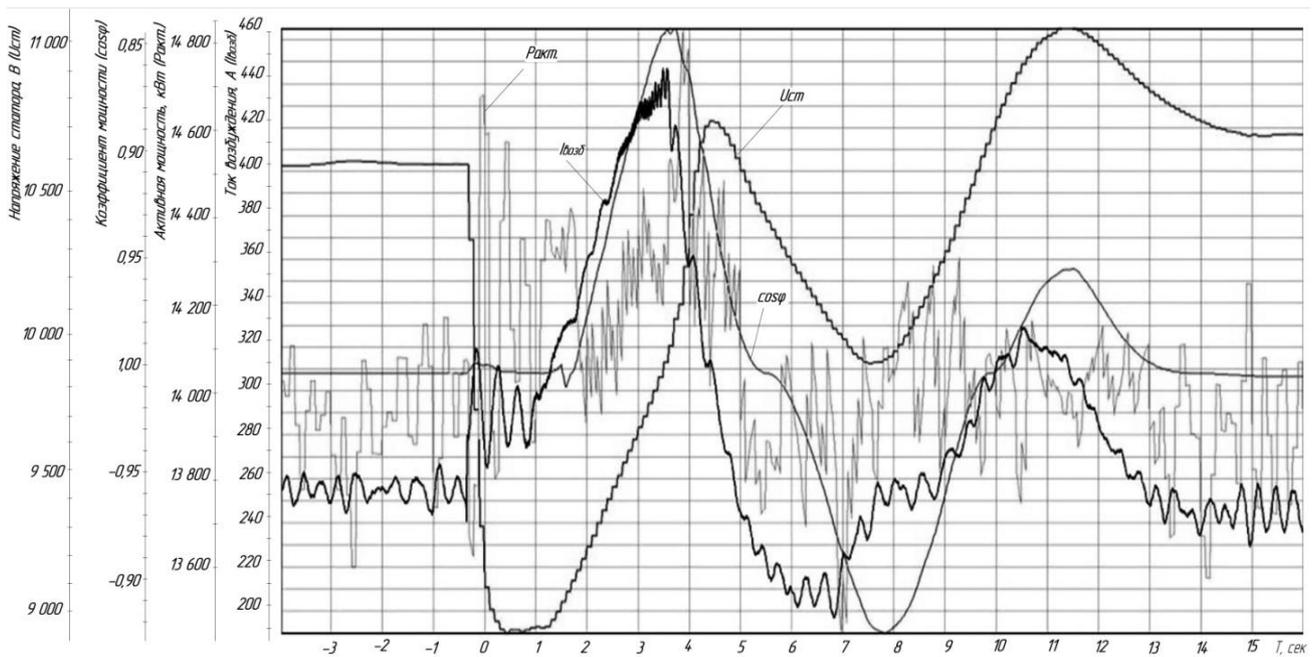
- если синхронный двигатель недовозбужден ( $\cos \varphi < 0$ ), регулятор 23 снижает ток возбуждения до значения уставки «Макс. Ток возбуждения»;

- если синхронный двигатель перевозбужден ( $\cos \varphi > 0$ ), регулятор 23 снижает ток возбуждения до значения уставки «Мин. ток возбуждения»;

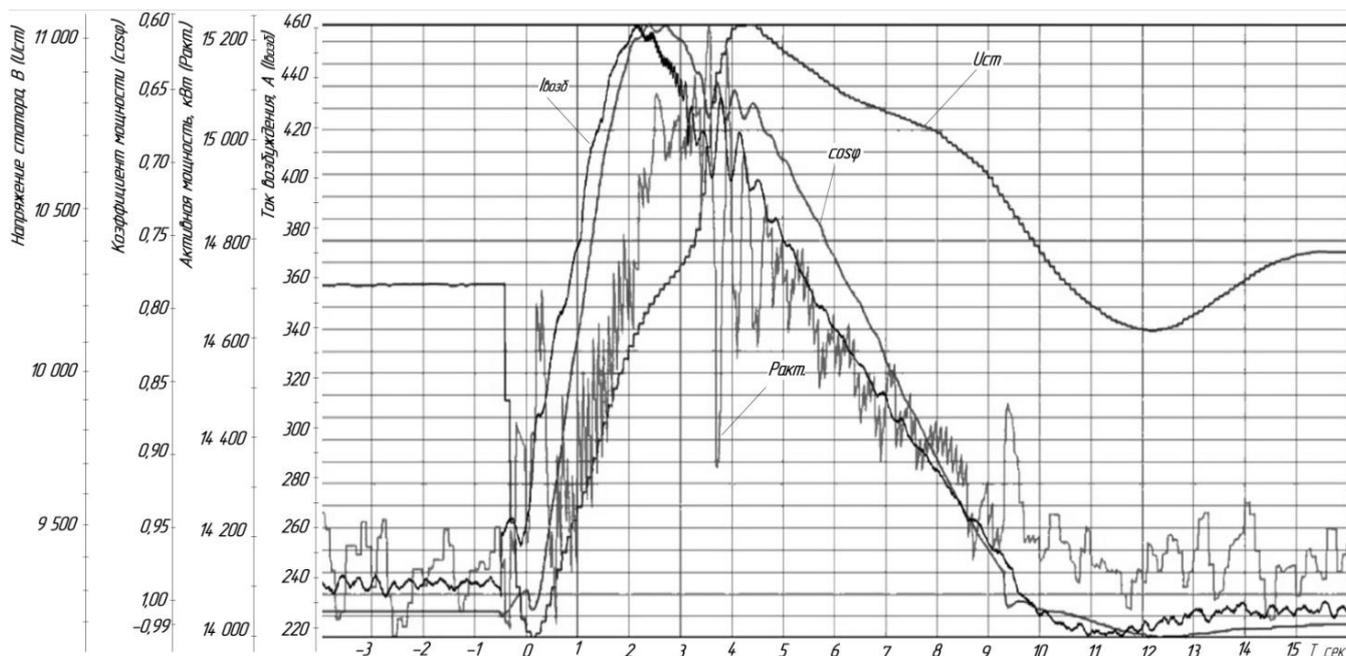
- если измеренное значение (вычисленного алгоритмом ЦОС БПФ)  $\cos \varphi$  равно уставке «Уставка COS φ» с допуском, определяемым уставкой «Допуск COS φ выхода форс» и значение тока возбуждения выше значения уставки «Макс. Ток возбуждения», регулятор 23 снижает ток до значения уставки «Макс. Ток возбуждения».

После выполнения вышеописанных условий управление переходит в режим регулирования по закону « $U_{ст} + \cos \varphi$ » – регулятор 8 и регулятор 1. Если значение тока возбуждения ниже значения уставки «Макс. Ток возбуждения» и измеренное значение (вычисленного алгоритмом ЦОС БПФ)  $\cos \varphi$  равно уставке «Уставка COS φ» с допуском, определяемым уставкой «Допуск COS φ выхода форс», управление сразу переходит в режим регулирования по закону « $U_{ст} + \cos \varphi$ » – регулятор 8 и регулятор 1.

Разработанный алгоритм исключает режим перерегулирования и предотвращает работу СД в зоне неустойчивой синхронизации. Экспериментально доказана эффективность изменения способа управления током возбуждения САР в послеаварийных режимах, исключающего работу СД в зоне неустойчивой синхронизации, что подтверждается экспериментальными осциллограммами (рис. 6).



а)



б)

Рис. 6. Экспериментальные осциллограммы параметров СД до и после изменения способа управления током возбуждения: а – до изменения параметров; б – после изменения параметров

**Выводы.** Определены способы повышения устойчивости работы мощных СД в послеаварийных режимах. С использованием методов математического моделирования исследована работа электроприводов с мощными СД в установившихся и переходных процессах для оценки статической и динамической устойчивости с учетом их взаимного влияния. Анализ результатов, полученных с помощью математического моделирования показал, что применение измененного алгоритма выхода из форсировки путем плавного, с заданной скоростью и дискретностью снижения тока возбуждения при одновременном контроле угла нагрузки и коэффициента мощности мощного СД исключает возможность выхода СД из синхронизма и предотвращает потерю статической устойчивости другого мощного СД. Достоверность результатов, полученных с помощью математического моделирования, подтверждается экспериментальными данными.

#### Список литературы

1. **Веников В.А.** Переходные электрохимические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
2. **Оптимизация систем управления электроприводами газоперекачивающих агрегатов** / Г.Р. Шварц, А.В. Голубовский, Л.А. Мигачёва и др. // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. – 2005. – № 37. – С. 171–176.
3. **Математические модели современных регуляторов возбуждения синхронных машин для расчета и анализа электрохимических переходных процессов и устойчивости энергосистем** /

Е.К. Лоханин, В.А. Глаголев, А.И. Скрыпник и др. // Сборник докладов III Междунар. науч.-практ. конф. «Энергосистема: управление, конкуренция, образование». – Екатеринбург, 2008. – С. 257–262.

4. **Динамическая устойчивость электрохимических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями на предприятиях нефтедобычи** / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов, Ю.А. Сычев, И.Г. Плотников // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 3. – С. 17–25.

5. **Повышение устойчивости синхронных двигателей при кратковременной потере питания** / Н.Д. Поляхов, С.В. Михалев // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. – № 10. – С. 62–68.

6. **Степанов С.Е., Крюков О.В.** Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетателей на компрессорных станциях ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2014. – № 8(710). – С. 50–56.

7. **Абрамович Б.Н., Круглый А.А.** Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.

8. **Голубовский А.В.** Опыт эксплуатации цифровой системы возбуждения ВТЦ-320/230 для синхронного двигателя СТД-12500-2 // Материалы науч.-техн. совета ОАО «Газпром». – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2002. – Т. 1. – С. 49–55.

9. **Гуревич Ю.Е.** Устойчивость нагрузки электрических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 208 с.

10. **Шойко В.П.** Автоматическое регулирование в электрических системах. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 195 с.

11. **Применение математического моделирования для анализа эффективности алгоритма функционирования возбудителя синхронного двигателя газоперекачивающего агрегата** / А.Л. Жеребцов, А.И. Байков, А.Д. Захаров, Д.В. Ковалев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 4. – С. 55–66.

12. Патент 2239936 Российская федерация, МКП Н02Р1/46. Способ управления током возбуждения синхронного электродвигателя. Открытое акционерное общество «Научно-исследовательское предприятие общего машиностроения»; Е.А. Кислов, А.В. Голубовский, Ю.Д. Левичев, И.В. Леонтьев; опубл.10.11.2004.

### References

1. Venikov, V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromechanical transients in electric systems]. Moscow, Vysshaya shkola, 1985. 536 p.

2. Shvarts, G.R., Golubovsky, A.V., Migacheva, L.A., Rasskazov, F.N., Kuznetsov, P.K. Optimizatsiya sistem upravleniya elektroprivodami gazoperekachivayushchikh agregatov [Optimization of electric drive control in gas compressor units]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2005, no. 37, pp. 171–176.

3. Lokhanin, E.K., Glagolev, V.A., Skrypnik, A.I., Tovstyak, T.O., Yurganov, A.A. Matematicheskie modeli sovremennykh regulyatorov возбуждения синхронных машин для расчета и анализа электромеханических переходных процессов и устойчивости энергосистем [Mathematical models of modern synchronous engine excitation regulators for calculation and analysis of electromechanical transients and power system stability]. *Sbornik докладов III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Energosistema: upravlenie, konferentsiya, obrazovanie»* [Collected works of the III International scientific and practical conference «Power system: management, competition, formation»]. Ekaterinburg, 2008, pp. 257–262.

4. Abramovich, B.N., Ustinov, D.A., Sychev, Yu.A., Plotnikov, I.G. Dinamicheskaya ustoychivost' elektromekhanicheskikh kompleksov s sinkhronnymi i asinkhronnymi dvigatelyami na predpriyatiyakh nefte dobychi [Dynamic stability of electromechanical complexes with synchronous and asynchronous engines at oil mining enterprises]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoe delo»*, 2011, no. 3, pp. 17–25.

5. Polyakhov, N.D., Mikhalev, S.V. Povyshenie ustoychivosti sinkhronnykh dvigateley pri kratkov-

remennoy potere pitaniya [Increasing the stability of synchronous engines under a short power supply loss]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2012, no. 10, pp. 62–68.

6. Stepanov, S.E., Kryukov, O.V. Povyshenie ustoychivosti raboty elektroprivodov tsentrobeznykh nagnetateley na kompressornykh stantsiyakh OAO «Gazprom» [Increasing the stability of the electric drive operation of centrifugal superchargers at compressor stations of OAO «Gazprom»]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2014, no. 8(710), pp. 50–56.

7. Abramovich, B.N., Krugly, A.A. *Vozbuzhdenie, regulirovanie i ustoychivost' sinkhronnykh dvigateley* [Excitation, regulation and stability of synchronous motors]. Leningrad, Energoatomizdat, 1983. 128 p.

8. Golubovsky, A.V. Opyt ekspluatatsii tsifrovoy sistemy возбуждения VTTs-320/230 для синхронного двигателя STD-12500-2 [Experience in operation of the digital excitation system BTL-320/230 for the synchronous engine СТД-12500-2]. *Materialy nauchno-tekhnicheskogo soveta OAO «Gazprom»* [Proceedings of the council on science and technology of OAO «Gazprom»]. Moscow, OOO «IRC Gazprom», 2002, vol. 1, pp. 49–55.

9. Gurevich, Yu. E. *Ustoychivost' nagruzki elektricheskikh sistem* [Load stability of electrical systems]. Moscow, Energoatomizdat, 1981. 208 p.

10. Shoiko, V.P. *Avtomaticheskoe regulirovanie v elektricheskikh sistemakh* [Automatic control in electrical systems]. Novosibirsk, NGTU, 2012. 195 p.

11. Zherebtsov, A.L., Baikov, A.I., Zakharov, A.D., Kovalev D.V. Primenenie matematicheskogo modelirovaniya для анализа эффективности алгоритма функционирования возбуждителя синхронного двигателя газопerekachivayushchego agregata [Application of mathematical modeling for the analysis of exciter operation algorithm efficiency of synchronous engines in a gas pumping unit]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2017, no. 4, pp. 55–66.

12. Kislov, E.A., Golubovsky, A.V., Levichev, Yu.D., Leontyev, I.V. *Sposob upravleniya tokom возбуждения синхронного электродвигателя* [Method of synchronous motor excitation current control]. Patent RF, no. 2239936, 2004.

*Жеребцов Андрей Леонидович*,  
ООО «Газпром трансгаз Сургут»,  
главный энергетик – начальник отдела главного энергетика,  
телефон (3462) 75-04-46.

*Zherebtsov Andrei Leonidovich*,  
ООО «Gazprom Transgaz Surgut»,  
Chief Power Engineer, Head of the Chief Power Engineer's Department,  
telephone (3462) 75-04-46.

*Чуйков Вадим Юрьевич*,  
ООО Научно-технический центр «Промышленная энергетика»,  
начальник отдела электротехнических систем,  
телефон (4932) 30-14-88,  
e-mail: promenergo@ivpromenergo.ru

*Chuikov Vadim Yuryevich*,  
ООО Scientific and Technical Center «Industrial Power Engineering»,  
Head of the Electric Power Systems Department,  
telephone (4932) 30-14-88,  
e-mail: promenergo@ivpromenergo.ru

*Шульпин Андрей Александрович*,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем,  
телефон (4932) 26-99-21.  
*Shulpin Andrei Aleksandrovich*,  
Ivanovo State Power Engineering University,  
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electric Systems Department,  
telephone (4932) 26-99-21.

УДК 621.316.925.2

## Централизованная дифференциальная защита цифровой подстанции с применением метода двойной записи

А.Л. Куликов<sup>1</sup>, В.Ю. Вуколов<sup>1</sup>, А.А. Колесников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

<sup>2</sup>ООО «НПП Микропроцессорные технологии», г. Новосибирск, Российская Федерация  
E-mail: inventor61@mail.ru, vvucolov@mail.ru, anton8094@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В электрических сетях продолжается переход от устаревших электромеханических реле к микропроцессорным устройствам релейной защиты и автоматики, однако сохраняется при этом традиционная децентрализованная архитектура построения. Альтернативный принцип построения системы релейной защиты и автоматики – централизованная система, которая может позволить снизить затраты как на оборудование, так и на эксплуатацию, а также повысить селективность защит. Перспективно применение централизованной дифференциальной защиты, характерными примерами организации которой являются метод дифференциальных колец и метод мульти-зональной дифференциальной защиты. Общим недостатком предлагаемых подходов с точки зрения эксплуатации современных электрических сетей является сложность их технической реализации. В связи с этим необходимо создание простой и высоконадежной централизованной дифференциальной защиты для цифровых подстанций.

**Материалы и методы:** Используются методы двойной записи и теории графов. Для оценки показателей надежности защиты использованы расчетные соотношения метода Марковских цепей.

**Результаты:** Предложен новый принцип организации централизованной дифференциальной защиты цифровых подстанций с применением метода двойной записи. Установлено, что разрабатываемая защита значительно превосходит по показателям надежности типовые технические решения.

**Выводы:** Предлагаемая защита имеет адаптацию к изменениям конфигурации при переключениях на подстанции. Разработанные технические решения позволяют выявлять повреждения трансформаторов тока и каналов связи, а также обладают высокими показателями надежности. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности реализации централизованной дифференциальной защиты с применением метода двойной записи для цифровых подстанций. Для внедрения централизованной дифференциальной защиты необходимо продолжить исследования в следующих направлениях: разработка микропроцессорного устройства централизованной дифференциальной защиты либо модификация и доработка существующих терминалов микропроцессорной защиты; выбор наиболее подходящего варианта коммуникаций с точки зрения надежности, экономичности и эксплуатационной пригодности; разработка типовых решений предлагаемой релейной защиты и автоматики.

**Ключевые слова:** цифровая подстанция, двойная запись, дифференциальная защита, зона защиты, контроль исправности линий связи, контроль исправности трансформаторов тока, матрицы, надежность релейной защиты, теория графов, централизованная защита.

## Centralized differential protection of the digital substation with double entry method application

A.L. Kulikov<sup>1</sup>, V.Ju. Vukolov<sup>1</sup>, A.A. Kolesnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

<sup>2</sup>ООО «Scientific-Production Enterprise “Microprocessor technologies”», Novosibirsk, Russian Federation  
E-mail: inventor61@mail.ru, vvucolov@mail.ru, anton8094@mail.ru

### Abstract

**Background:** Despite the ongoing transition from obsolete electromechanical relays to microprocessor-based relay protection and automation devices (RPA) in electrical networks, the RPA system architecture remains decentralized. Another