



Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать следующее заключение:

1. Для исследования расходомеров различных типов создан лабораторно-исследовательский стенд, снабженный автоматизированной системой сбора и визуализации данных (SCADA), показаны его возможности по определению метрологических и ди-

намических характеристик расходомеров.

2. На основании принципа действия электромагнитных расходомеров выявлены и практически подтверждены причины дополнительной погрешности электромагнитных расходомеров, предложены возможные пути решения проблемы точного измерения расхода.

Библиографический список

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон Российской Федерации от 23.11. 2009 № 261.
2. Об обеспечении единства измерений: федер. закон Российской Федерации от 26.06.2008 № 102.
3. Кулаков М.В. Технические измерения и приборы для

химических производств. 4-е изд. М.: Машиностроение, 2008. 424с.

4. Половнева С.И., Елшин В.В., Толстой М.Ю. Технические измерения и приборы. Измерение расхода газов и жидкостей: учеб. пособие. 2-е изд. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2010. 88 с.

5. <http://www.kipexpert.ru>

УДК 621.313

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ДВУХ ВАРИАНТАХ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Р.А.Пузаткин¹, Г.Г.Гоппе², В.Е.Павлов³

Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Исследованы с использованием вычислительных экспериментов алгоритмы самозапуска электроприводов технологической установки. Рассмотрено построение математической модели асинхронного двигателя (АД) с учетом эффекта вытеснения тока с применением датчиков тока и скольжения. Исследован характер переходных процессов в двигателе при пуске и набросе нагрузки.

Ил. 7. Табл. 1. Библиогр. 8 назв.

Ключевые слова: самозапуск электроприводов; асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; активные и индуктивные сопротивления; эффект вытеснения тока.

COMPARATIVE EVALUATION OF SELF-STARTING CONDITIONS OF TECHNOLOGICAL PLANT ELECTRIC DRIVES IN TWO VARIANTS OF THE MATHEMATICAL MODEL OF AN INDUCTION MOTOR

R.A. Puzatkin, G.G. Goppe, V.E. Pavlov

National Research Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074.

The authors study the self-starting algorithms of technological plant electric drives with the use of computational experiments. They consider a mathematical modeling of an induction motor (AM), taking into account the effect of current displacement with the use of sensors of current and slippage. The authors study the nature of transient processes in the engine when starting and loading.

7 figures. 1 table. 8 sources.

Key words: self-starting of electric drives; squirrel-cage motor; ohmic and inductive resistances; effect of current displacement.

На крупных предприятиях химической, нефтеперерабатывающей, металлургической промышленности, машиностроения, энергетики и других эксплуатируется большое число электроприводов, насчитывающих от десятков до нескольких тысяч на одном

предприятии. Отключение электроприводов при кратковременных перерывах электропитания или существенном его снижении может привести к большим материальным потерям из-за расстройств технологического процесса, значительного времени восстановле-

¹Пузаткин Роман Александрович, аспирант, тел.: (3952) 405128, e-mail: elprivod@istu.edu

Puzatkin Roman Alexandrovich, postgraduate student, tel.: (3952) 405128, e-mail: elprivod@istu.edu

²Гоппе Гарри Генрихович, доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и электрического транспорта, тел.: (3952) 405128, e-mail: elprivod@istu.edu

Goppe Harry Genrikhovich, Doctor of technical sciences, professor of the chair of Electric Drive and Electric Transport, tel.: (3952) 405128, e-mail: elprivod@istu.edu

³Павлов Владимир Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрического транспорта, тел.: (3952) 405128, e-mail: pvew52@mail.ru

Pavlov Vladimir Evgenievich, Candidate of technical sciences, associate professor of the chair of Electric Drive and Electric Transport, tel.: (3952) 405128, e-mail: pvew52@mail.ru



ния установившегося режима всей технологической цепи и даже возможных аварий.

Впечатляющие данные приведены в [1], согласно которым стоимость ущерба от плохого качества электрической энергии оценивается для американской экономики более чем в 150 млрд. рублей в год. Не являются в этом смысле исключением и установки нефтеперерабатывающего завода, в частности установки гидрокрекинга. Судя по сложности технологического процесса и производительности в переработке нефти (несколько миллионов тонн в год) – это самостоятельный завод небольшой или средней мощности. Количество эксплуатируемых электроприводов здесь более двухсот, только число низковольтных (до 0,4 кВ) составляет 199.

Из-за того, что переработка нефти – это пожаро- и взрывоопасное производство, то производственные процессы здесь отработаны настолько тщательно, что отключение одного или нескольких электроприводов от сети, вызванное возмущениями в ней, не приведет к критическим последствиям. Для этого предусмотрена соответствующая автоматика и технологические блокировки. Однако ущерб от временной остановки и восстановления технологического процесса может составлять до сотен тысяч рублей. Казалось бы, что увеличение мощности электрических станций, улучшение качества энергетического оборудования, высокое быстродействие противоаварийной автоматики и устойчивость энергетических систем должны повысить надежность обеспечения предприятий электроэнергией. Факты же говорят об обратном. Как отмечается в [2], в нашей стране существуют еще старая система взглядов и старые нормы проектирования, рассчитанные на защиту предприятий от 2-3 отключений электроэнергии в год, в то время как в некоторых регионах отключений происходит от 10 до 40 в год. Основными причинами нарушения надежности электроснабжения потребителей являются короткие замыкания в схемах внешнего (110, 220, 500 кВ) и внутреннего (6-10 кВ) электроснабжения. Провалы напряжения у потребителей электроэнергии настолько же неизбежны, насколько неизбежны короткие замыкания в электрических сетях, число которых растет по мере старения и изношенности электрооборудования. На сегодняшний день в энергетике он составляет 70-80% и следует ожидать лишь увеличения частоты возникновения провалов напряжения. Традиционный подход при исследовании условий самозапуска состоит в следующем [3-6]:

- По известным или оценочным характеристикам электропривода, механизма и зависимости момента сопротивления от оборотов двигателя рассчитывается характер изменения скорости двигателя за время действия возмущения в электрической сети. При бестоковой паузе двигательный момент равен нулю и скорость двигателя определяется выбегом от тормозного момента. Фактическая скорость и величина момента к началу восстановления нормального напряжения определяют характер разгона двигателя и график пускового тока.

- По суммарному пусковому току и току отдельных двигателей определяется порядок самозапуска. Если суммарный ток больше некоторой критической величины, например, трехкратного номинального тока трансформатора, то выбирается такое число одновременно запускаемых электроприводов, суммарный ток самозапуска которых меньше этой критической величины.

Такой подход имеет ряд существенных недостатков:

- Весьма приближенно определяется ряд параметров математической модели асинхронного двигателя, в частности, момента инерции всех вращающихся частей, приведенных к валу двигателя.

- Момент сопротивления в процессе выбега и при разгоне после восстановления напряжения считается заранее известным. Чаще всего он принимается в виде квадратичной функции от частоты вращения. На самом же деле для турбомеханизмов, работающих на статический напор, он имеет весьма сложную зависимость от скорости.

- Не учитывается момент трения при холостом ходе механизма, то есть при работе на закрытую задвижку.

- Из-за отсутствия математических моделей, особенно уравнений динамики, таких переменных, как производительность или напор, последние вообще не рассчитываются или оцениваются весьма приближенно.

От всех перечисленных недостатков свободен подход, связанный с использованием при исследовании условий самозапуска математических моделей системы электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль. Современные быстродействующие ПЭВМ и их программное обеспечение позволяют моделировать, например, процессы в такой сложной системе, как трансформатор и несколько десятков подключенных к нему устройств технологической цепи электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль.

Пример блочной структурной схемы одного из комплексов приведен на рис.1.

Рассматриваемая на рис. 1 структурная схема включает математические модели 11 технологических цепочек – электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль. Каждый из блоков от Н10/1 до Н23 включает математические модели асинхронного двигателя, турбомеханизма и трубопроводной магистрали. В качестве примера на рис. 2 приведена модель электропривода насоса Н10/1, а на рис.3 – модель центробежного насоса Н10/1 с трубопроводной магистралью.

На основе входных и промежуточных переменных этих моделей сформированы математические модели нагрузочного момента, момента трения механизма и его КПД. Они также находятся в составе названных блоков. Широко применяемые в настоящее время методы моделирования асинхронных двигателей, позволяющие рассчитывать характер электромагнитных и электромеханических процессов, происходящих в ста-



тических и динамических режимах электроприводов, не учитывают эффекта вытеснения тока, действие которого в значительной мере сказывается на энергетических характеристиках электроприводов, особенно в переходных режимах, что приводит к недостоверным оценкам динамических показателей.

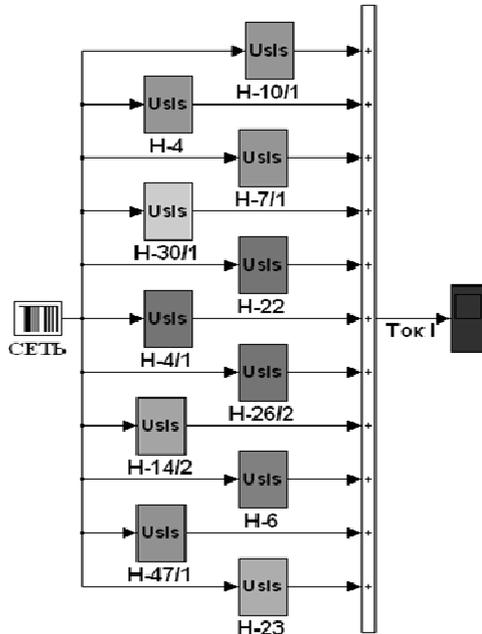


Рис.1. Блочная структурная схема для исследования условий самозапуска электроприводов турбомеханизмов (модель ТП-3А/4 Тр-р1 система «Б»)

Известно [7], что с увеличением частоты тока в стержнях обмотки короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя возникает эффект вытеснения тока, в результате которого плотность тока в верхней части стержней возрастает, а в нижней – уменьшается.

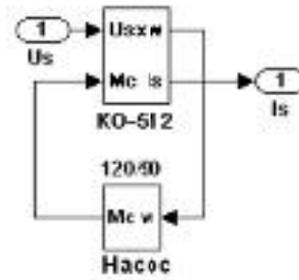


Рис.2. Модель электропривода насоса Н10/1

В процессе пуска асинхронного двигателя изменяется не только активное сопротивление ротора [7], но и индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом действия эффекта вытеснения тока может быть определено по следующему выражению:

$$x_{2\xi} = x_2 K_X(i), \quad (1)$$

где $K_X(i)$ – коэффициент изменения индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока:

$$K_X(i) = \frac{\lambda_{\Pi 2\xi} + \lambda_{\Pi 2} + \lambda_{D2}}{\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\Pi 2} + \lambda_{D2}}. \quad (2)$$

Здесь $\lambda_{\Pi 2}$ – коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора; $\lambda_{\Pi 2}$ – коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора; λ_{D2} – коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора; $\lambda_{\Pi 2\xi}$ – коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора с учетом эффекта вытеснения тока, значение которого изменяется в соотношении, обратно пропорциональном току [7].

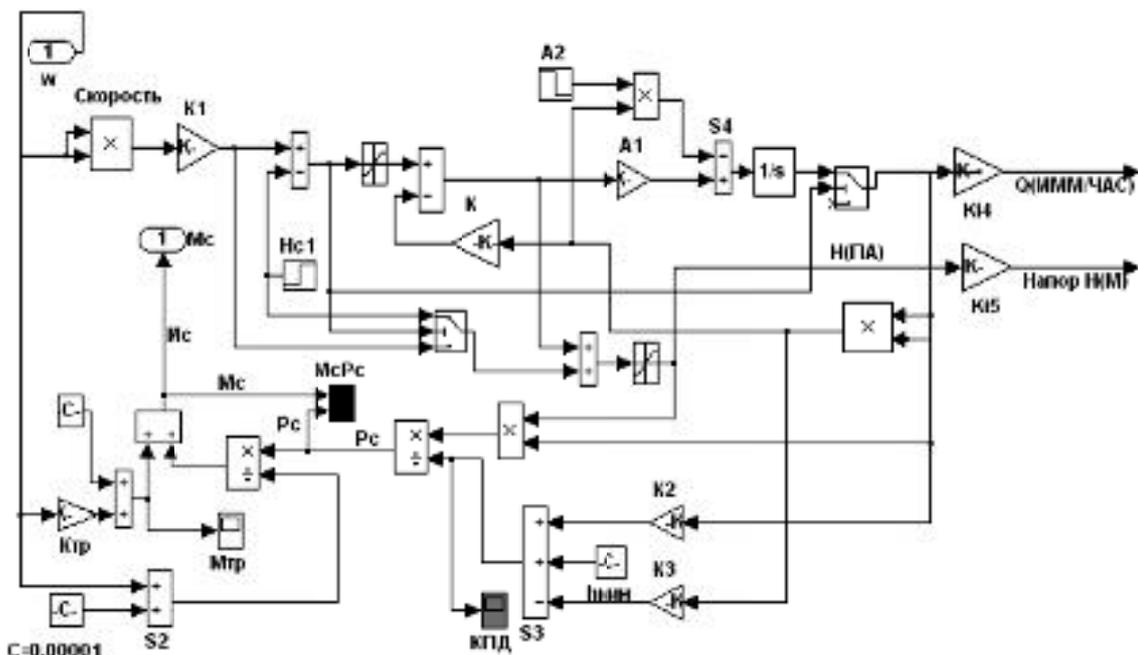


Рис.3. Модель центробежного насоса Н10/1 с трубопроводной магистралью



Представим уравнение (2) в виде

$$K_x(i) = \frac{\sum \lambda'_2 + \frac{x(i)}{K_{\Pi}}}{\sum \lambda_2}, \quad (3)$$

где $\sum \lambda'_2$ – составляющая суммарных коэффициентов магнитных проводимостей рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора, не зависящая от тока; $x(i)$ – составляющая коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора, зависящая от тока; K_{Π} – кратность пускового тока двигателя; $\sum \lambda_2$ – сумма коэффициентов магнитных проводимостей рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора:

$$\sum \lambda_2 = \lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\text{л}2} + \lambda_{\text{д}2}. \quad (4)$$

Для установившегося режима (ток $i = I_H$; $K_{\Pi} = 1$; $x(i) = x_H$) уравнение (3) примет вид

$$1 = \frac{\sum \lambda'_2 + x_H}{\sum \lambda_2}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) можно определить для тока $i = I_H$:

$$\frac{x_H}{\sum \lambda_2} = 1 - \left(\frac{K_x K_{\Pi} - 1}{K_{\Pi} - 1} \right). \quad (7)$$

Таким образом, по уравнению (7) можно рассчитать долю составляющей коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора, зависящую от тока, для тока $i = I_H$. Для других значений токов эта доля будет изменяться в обратно пропорциональном отношении и может быть рассчитана для конкретного двигателя.

В качестве примера по исходным данным двигателя 4A180S4Y3 найдем коэффициент изменения индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока для тока $i = I_H$:

$$K_x = X_{K\Pi} / (X_1 + X_2) = 0,746.$$

По уравнению (7) рассчитаем долю составляющей коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора для тока $i = I_H$:

$$\frac{x_H}{\sum \lambda_2} = 1 - \left(\frac{K_x K_{\Pi} - 1}{K_{\Pi} - 1} \right) = 0,2964.$$

Для других токов расчет значений этой доли сведен в таблицу.

Ток i	I_H	$2I_H$	$3I_H$	$4I_H$	$5I_H$	$6I_H$	$7I_H$
$\frac{x(i)}{\sum \lambda_2}$	0,2964	0,1482	0,0988	0,0741	0,05928	0,0494	0,0423

Совместное решение уравнений (3) и (5) для тока $i = I_H$ дает следующий результат:

$$\frac{\sum \lambda'_2}{\sum \lambda_2} = \frac{K_x K_{\Pi} - 1}{K_{\Pi} - 1}. \quad (6)$$

Модель асинхронного двигателя 4A180S4Y3 во вращающейся системе координат с учетом изменений активного и индуктивного сопротивлений ротора под влиянием эффекта вытеснения тока приведена на рис.4.

Модель содержит блок расчета параметров «БЛОК1», структура которого показана на рис. 5. Расчет параметров производился по следующим формулам:

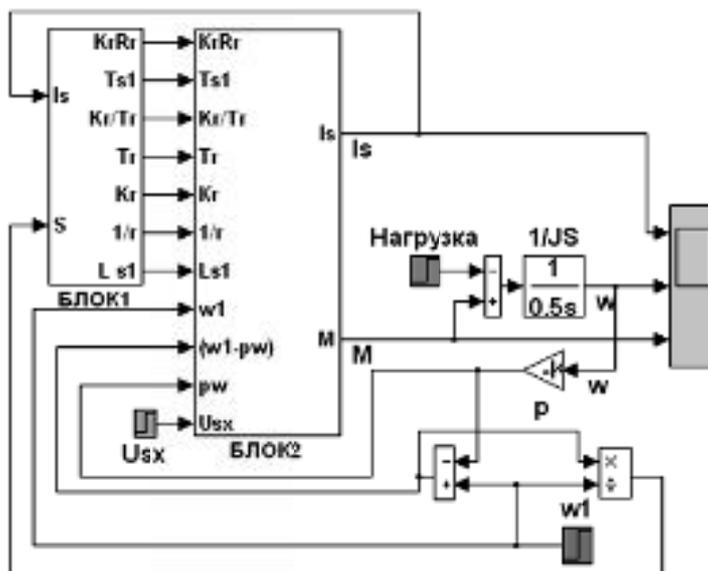


Рис.4. Модель асинхронного двигателя 4A180S4Y3 во вращающейся системе координат с учетом эффекта вытеснения тока

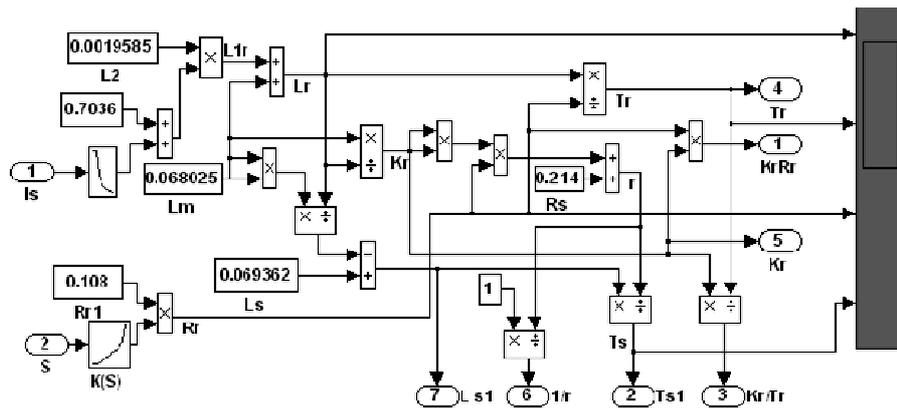


Рис. 5. Расчет параметров АД

$$L_{Tr} = L_2 K_X(i), \quad (8)$$

$$L_r = L_{Tr} + L_m, \quad (9)$$

$$L_s = L_{1S} + L_m, \quad (10)$$

$$K_r = L_m / L_r, \quad (11)$$

$$R_r = R_r K(S), \quad (12)$$

$$r = R_s + K_r^2 R_r, \quad (13)$$

$$T_r = L_r / R_r, \quad (14)$$

$$T_{s1} = (L_s - L_m^2 / L_r) / r, \quad (15)$$

где $L_2 = X_2' / 314 = 0,0019585$ Гн; $L_m = X_m / 314 = 0,068025$ Гн; $L_{1S} = X_1 / 314 = 0,001337$ Гн; $R_r = 0,1080$ м; $R_s = 0,2140$ м.

На рис.6 приведены переходные процессы по току статора i_s , скорости ω и моменту M двигателя при пуске и набросе номинальной нагрузки в момент времени $t = 1,5$ сек., полученные на модели асинхронного двигателя 4A180S4Y3 во вращающейся системе координат без учета эффекта вытеснения тока (рис.6,а) и на модели этого же двигателя (см.рис.5), учитывающей вытеснение тока (рис.6,б). Сравнение переходных процессов на рис.6,а и рис.6,б позволяет сделать следующие выводы:

- Максимальный момент двигателя увеличивается от значения 280 нм до значения 329 нм, а пусковой момент двигателя увеличивается пропорционально сопротивлению ротора от значения 140 нм до значения 210 нм. Эти значения соответствуют номинальным данным двигателя.

- Время пуска двигателя до установившегося значения скорости при учете эффекта вытеснения тока уменьшается с 0,8 до 0,6 сек. Последняя величина ближе к экспериментальным данным. Поэтому при расчете условий самозапуска целесообразно учитывать эффект вытеснения тока в обмотке ротора.

При исследовании структурных схем или математических моделей технологических комплексов на ПЭВМ можно получить графики поведения любой переменной уравнений как при отработке входных воздействий, так и в установившемся режиме.

Для специалистов, занятых вопросами самозапуска, исходными данными являются те ограничения на переменные процесса управления, при которых самозапуск еще целесообразен. Границы на изменения

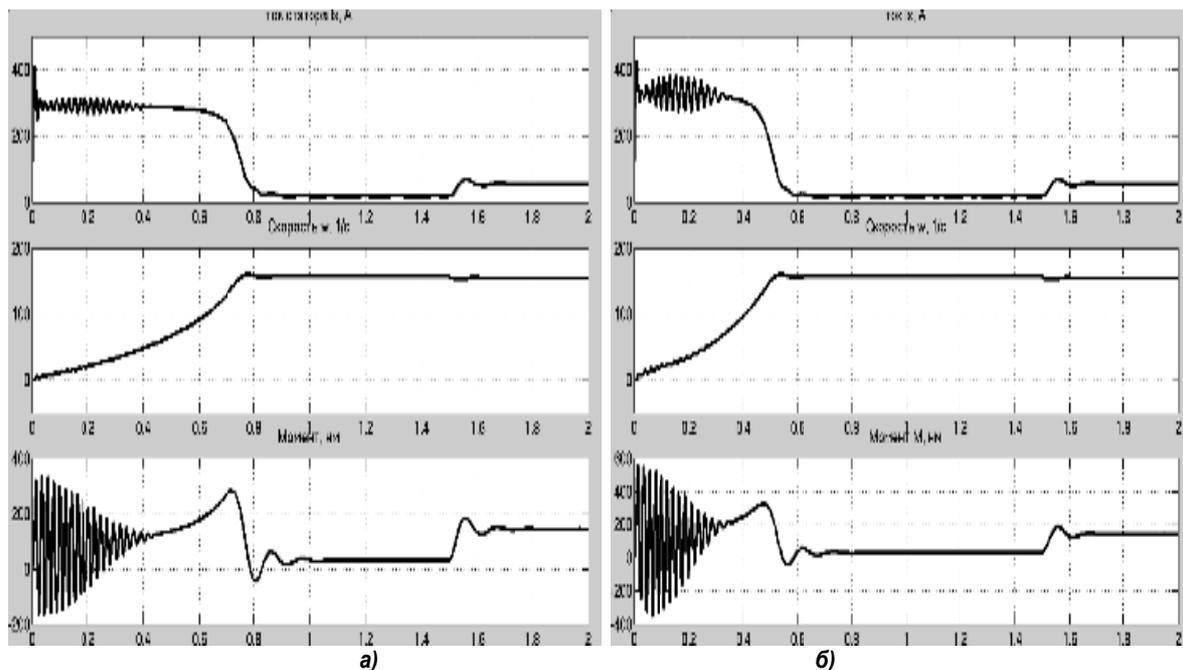


Рис.6. Переходные процессы по току статора, скорости ω и моменту M двигателя при пуске и набросе нагрузки в момент времени $t = 1,5$ сек

переменных устанавливаются производственным персоналом – энергетиками, технологами, механиками. Иногда может иметь место конфликт интересов и тогда решающим, по-видимому, должно быть мнение технологов. Для турбомеханизмов переменными, определяющими алгоритмы самозапуска, являются границы изменения производительности и напора турбомеханизмов, а иногда некоторые зависимые от них величины – концентрации, уровни продукта в емкостях и др. Для энергетиков в процессе самозапуска решающими величинами являются пусковые токи двигателей и трансформатора и время их действия. Поэтому при исследовании структурных схем комплексов нами были выделены следующие показатели:

- Суммарные токи самозапускаемых электроприводов (ток трансформатора).
- Величины пусковых токов отдельных электродвигателей.
- Скорость вращения каждого двигателя.
- Значение производительности для каждого турбомеханизма во время возмущения в питающей сети и при восстановлении напряжения.
- Графики напоров турбомеханизмов.

Наиболее «тяжелыми» условиями для самозапуска являются последствия от бестоковых пауз, поэтому их действию на рассматриваемые математические модели уделено наибольшее внимание.

По разработанной методике исследованы условия самозапуска всех предусмотренных для этого электроприводов. На основе этих данных разработан порядок самозащиты электроприводов с применением активных и пассивных технических средств самозапуска.

Графики по материалам исследований математических моделей выделенного выше комплекса представлены на рис 7.

Информация на графиках имеет следующие особенности:

- Токи показаны в виде гармонических функций времени. Для того чтобы в выбранный момент времени иметь представление о среднеквадратичном значении рассматриваемой величины, достаточно ближайшее к данной точке амплитудное значение поделить на $\sqrt{2}$.

- По мере увеличения времени возмущения растет длительность пускового тока после восстановления нормального режима. Так, для рассматриваемого комплекса при бестоковой паузе в 0,3 сек продолжительность пускового суммарного тока составляет 0,4 сек, соответственно при паузах в 1,5 и 3,5 сек – 1,4 и 2,75 сек для модели без учета эффекта вытеснения тока; для модели с учетом эффекта вытеснения тока при тех же паузах – 0,2; 1,0 и 1,6 сек соответственно. Таким образом, время переходного процесса по току после бестоковой паузы с учетом эффекта вытеснения тока сокращается при паузе в 3,5 сек в 1,7 раза.

- Для каждого из графиков пускового тока в начальный момент времени пуска наблюдается «выброс» тока. Величина выброса тока после бестоковой паузы для первой и второй модели различна. Для модели без учета эффекта вытеснения тока величина выброса тока не превышает 600%, а для модели с учетом эффекта вытеснения тока эта величина достигает 800% от амплитуды суммарного номинального тока двигателей.

Природа этих бросков объясняется двумя дополнительными составляющими пускового тока: аперiodической (свободной) и составляющей, вызванной несовпадением фаз восстановившегося напряжения и остаточной ЭДС электродвигателей.

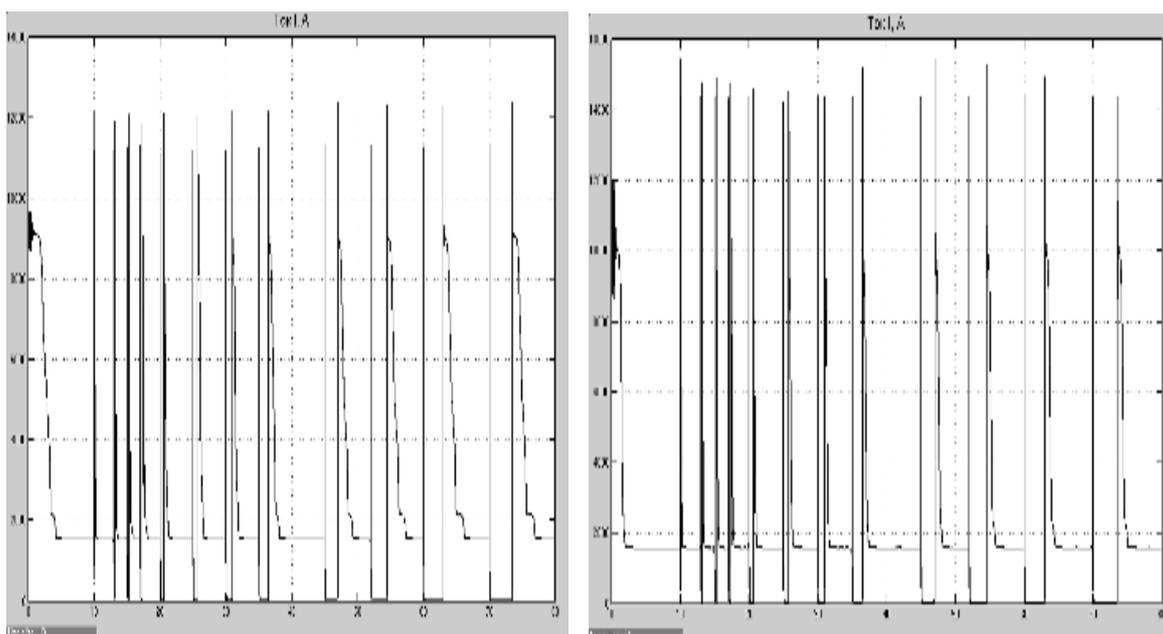


Рис. 7. Токи самозапуска на шинах трансформатора без учета (слева) и с учетом (справа) вытеснения тока



Анализ графиков тока трансформатора двух моделей комплекса показывает, что при учете изменений активного и индуктивного сопротивлений ротора под влиянием эффекта вытеснения тока ротора возмущение тока трансформатора возрастает на 9%. Следова-

тельно, недооценка эффекта вытеснения тока при формировании алгоритма самозапуска электроприводов ведет к неточной оценке силы тока на шинах питающего трансформатора и, как следствие, может вести к неправильному составлению алгоритма.

Библиографический список

1. Носов К.Б., Дворак Н.М. Способы и средства самозапуска электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1982.
2. Гамазин С.И., Пупин В.М., Марков Ю.В. Динамические компенсаторы искажений напряжения как способ повышения эффективности работы потребителей при нарушениях электроснабжения // Главный энергетик. 2006. №6. С. 24-29.
3. Голоднов Ю.М., Харенян А.Х. Самозапуск электродвигателей. М.: Энергия, 1974.
4. Гамазин С.И. Самозапуск электрических двигателей. М.: Московский энергетический институт, 1979.
5. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Гамазин С.И., Садыкбеков Т.А. Переходные процессы в системах электроснабжения с электродвигательной нагрузкой. Алма-Ата «Гылым», 1991.
7. Проектирование электрических машин: учебное пособие для вузов / под ред. И.П.Копылова. М.: Энергия, 1980. 496 с.
8. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э.Кравчик, М.М.Шлаф, В.И.Афонин и др. М.: Энергоатомиздат, 1982.

УДК.621.317.785

РАЗДЕЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ОСНОВНОЙ И ВЫСШИХ ГАРМОНИК – ПУТЬ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

А.С.Смирнов¹, Н.Н.Солонина², К.В.Суслов³

Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, 664083, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Показана необходимость раздельного измерения энергии ОГ и ВГ. Измерение энергии ВГ и решение юридических вопросов, связанных с оплатой за эту энергию, должно побудить как электроснабжающие организации, так и потребителей принимать технические и организационные меры по снижению уровня ВГ в сети. Все это должно привести к улучшению формы напряжения питающей сети и, соответственно, к повышению эффективности использования электроэнергии потребителями.

Ил. 3. Библиогр. 6 назв.

Ключевые слова: электроэнергетика; качество электрической энергии; эффективность использования электроэнергии; счетчик энергии основной и высшей гармоник; энергия высших гармоник.

SEPARATE ENERGY MEASUREMENT OF FUNDAMENTAL AND HIGHER HARMONICS – A WAY TO INCREASE THE EFFICIENCY OF ELECTRIC POWER USE

A.S. Smirnov, N.N. Solonina, K. V. Suslov

National Research Irkutsk State Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074.

The authors demonstrate the need for separate measurement of the energy of the fundamental harmonic and higher harmonic. The measurement of the energy of higher harmonic and the solution of the legal issues related to the payment for this energy should encourage power supplying organization as well as consumers to take technical and organizational measures to reduce the level of higher harmonic in the network. All these should improve the voltage forms of the power system and, accordingly, to increase the efficiency of energy use by consumers.

3 figures. 6 sources.

Key words: electrical power engineering; quality of electric power; efficiency of energy use; energy meter of fundamental and higher harmonics; energy of higher harmonics.

¹Смирнов Анатолий Серафимович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, тел.: (3952) 405253, 89027673385, e-mail: otep@istu.edu

Smirnov Anatoly Seraphimovich, Candidate of technical sciences, associate professor of the chair of Electric Power Supply and Electrical Engineering, tel.: (3952) 405253, 89027673385, e-mail: otep@istu.edu

²Солонина Нафиса Назиповна, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, тел.: (3952) 405253, 89500846006, e-mail: otep@istu.edu

Solonina Nafisa Nazipovna, Candidate of technical sciences, associate professor of the chair of Electric Power Supply and Electrical Engineering, tel.: (3952) 405253, 89500846006, e-mail: otep@istu.edu

³Суслов Константин Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, тел.: (3952) 405253, 89148704673, e-mail: souslov@istu.edu

Suslov Konstantin Vitalievich, Candidate of technical sciences, associate professor of the chair of Electric Power Supply and Electrical Engineering, tel.: (3952) 405253, 89148704673, e-mail: souslov@istu.edu