



## ЭЛЕКТРОННАЯ МЕТКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЗАДЕРЖКИ ТОКА РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Головин М.М., Портнягин Н.Н.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

golovin.maksim.m@gmail.com

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования определяется тем, что в подчиненных системах управления асинхронным электроприводом электромагнитная инерционность роторной цепи учитывается, как правило, косвенно (через постоянную времени ротора), тогда как при повышении быстродействия токовых контуров она формирует измеримую задержку и влияет на фазовый запас системы. НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ. Работа формирует экспериментальную базу для верификации динамических моделей асинхронной машины, включая оценку эквивалентной постоянной времени ротора по данным осциллографирования. ЦЕЛЬ. Разработать и апробировать метод экспериментального определения задержки тока ротора относительно опорного события на стороне статора на основе кратковременной электронной метки. МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ. Предложен способ «маркировки» процесса прямоугольным импульсом, вводимым в фазу статора. Метка формируется генератором на таймере NE555 и подается через оптрон TLP627(F), обеспечивающий гальваническую развязку сигнальной и силовой цепей. Регистрация выполняется цифровым осциллографом с дифференциальным щупом; испытания проведены на лабораторном двигателе IMM71 (370 Вт) в режиме заторможенного ротора ( $s=1$ ). РЕЗУЛЬТАТЫ. Показана устойчивость формирования и регистрации импульсной метки на фоне сетевого напряжения 50 Гц. По осциллограммам получена оценка фазовой задержки тока ротора относительно опорного события порядка 40–45 градусов, что соответствует 2.2–2.5 мс при частоте 50 Гц. ВЫВОДЫ. Электронная метка повышает воспроизводимость измерения задержки в асинхронной машине с фазным ротором и может использоваться для валидации имитационных моделей и для настройки токовых контуров, учитывающих электромагнитную инерционность роторной цепи.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель; фазный ротор; электронная метка; фазовый сдвиг; задержка тока; токовый контур; оптронная развязка; NE555.

**Для цитирования:** Головин М.М., Портнягин Н.Н. Электронная метка для экспериментальной оценки задержки тока ротора асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 103-111. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-103-111.

## ELECTRONIC MARKER FOR EXPERIMENTAL ESTIMATION OF ROTOR CURRENT DELAY IN AN INDUCTION MOTOR

Golovin M.M., Portnyagin N.N.

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia

golovin.maksim.m@gmail.com

**Abstract:** RELEVANCE. In subordinate and field-oriented control of induction motor drives, rotor electromagnetic inertia is often treated implicitly. However, when the bandwidth of inner current loops is increased, rotor dynamics introduces a measurable delay and affects stability margins. SCIENTIFIC SIGNIFICANCE. The study provides an experimental basis for validating induction-machine dynamic models and for estimating an equivalent rotor time constant from oscillograms. OBJECT. To develop and validate a laboratory method for estimating rotor current delay with respect to a stator-side reference event using a short electronic marker. METHODOLOGY. A rectangular pulse marker is injected into one stator phase. The marker is generated by an NE555 pulse generator and delivered through a TLP627(F) optocoupler, providing galvanic isolation. A digital oscilloscope with a differential probe records the marker on the 50 Hz waveform together

with rotor current. The test is carried out in a locked-rotor condition (slip  $s=1$ ). **RESULTS.** The marker is reliably detected on top of the supply waveform. The measured phase delay between the stator reference and the rotor current response is about 40–45 degrees (2.2–2.5 ms at 50 Hz). **CONCLUSIONS.** The electronic marker approach improves repeatability of rotor delay measurements and can be used for simulation validation and current-loop tuning that accounts for rotor electromagnetic inertia.

**Keywords:** induction motor; wound rotor; electronic marker; phase shift; current delay; current loop; optocoupler isolation; NE555.

**For citation:** Golovin M.M., Portnyagin N.N. Electronic marker for experimental estimation of rotor current delay in an induction motor. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 103-111. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-103-111.

### **Введение (Introduction)**

Асинхронный электропривод (АД) широко применяется в технологических установках и вспомогательных механизмах, включая объекты нефтегазовой промышленности. Для повышения энергоэффективности и управляемости активно используются преобразователи частоты и подчиненные системы управления, в которых внутренний токовый контур строится существенно быстрее внешних контуров скорости и момента.

При стремлении увеличить полосу пропускания токового контура проявляется влияние внутренних динамических факторов: электрической постоянной времени ротора, нелинейностей магнитной системы, задержек измерительного тракта, дискретизации и вычислительных задержек. Эти факторы приводят к уменьшению фазового запаса, перегулированию и снижению устойчивости при фиксированных настройках регулятора.

Для асинхронной машины с фазным ротором роторная цепь доступна для прямого измерения тока через контактные кольца. Однако классическое определение фазового сдвига между синусоидальными сигналами статора и ротора не обеспечивает стабильной воспроизводимости из-за неопределенности опорной точки и помех.

Актуальность работы связана с потребностью в практическом лабораторном методе, позволяющем однозначно привязать измерение задержки отклика ротора к событию на стороне статора.

Цель исследования — разработка и апробация метода измерения задержки тока ротора относительно опорного события на стороне статора на основе кратковременной электронной метки.

Научная значимость — формирование экспериментальной базы для верификации динамических моделей асинхронной машины и ориентировочной оценки постоянной времени ротора.

Практическая значимость — повышение воспроизводимости измерений, необходимых для настройки токовых контуров и согласования модели и объекта.

Отдельно следует подчеркнуть, что наблюдаемое «запаздывание» в асинхронной машине не сводится только к  $r-L$  динамике роторной цепи. В силовой магнитной цепи (статорный и роторный сердечники) при перемагничивании возникают динамические эффекты: вихревые токи, перераспределение потоков по сечению, релаксация доменной структуры и частотно-зависимые потери. Эти явления приводят к тому, что магнитная индукция  $B$  и намагничивающая сила  $H$  могут быть сдвинуты по фазе даже при синусоидальном воздействии, а эквивалентная магнитная ветвь приобретает инерционность. В современной литературе такие эффекты рассматриваются в контексте моделей потерь в магнитных сердечниках и динамической гистерезисной зависимости  $B(H, f)$ , в том числе через разделение потерь на гистерезисные, вихретоковые и «аномальные» составляющие [1].

В данной работе экспериментальная идея состоит в том, чтобы использовать электронную метку как опорное событие на стороне статора и оценить суммарную задержку отклика ротора, которая включает вклад электромагнитной связи и динамики магнитной цепи. Таким образом, измерение задержки служит косвенным тестом на наличие конечного времени установления магнитных процессов в машине.

### **Литературный обзор (Literature Review)**

Дополнительную теоретическую интерпретацию задержки удобно строить через уравнения релаксационного типа. В классической теории магнитного резонанса Ф. Блох

ввёл феноменологические уравнения для вектора намагниченности  $M$ , включающие прецессию и релаксацию к равновесному состоянию с постоянными времени  $T_1$  и  $T_2$  [2]. Несмотря на то что исходно уравнения Блоха относятся к ядерной намагниченности, их важная идея — существование конечного времени релаксации, из-за которого система «не успевает» мгновенно следовать воздействию — универсальна и часто используется как модель первого порядка для описания инерционности магнитных процессов.

Для ферромагнитных сердечников электрических машин аналогичные эффекты проявляются как фазовый сдвиг между  $H$  и  $B$  и как частотно-зависимые потери. Обзор современных моделей потерь в магнитных сердечниках подчёркивает роль динамических механизмов (вихревые токи, перемещение доменных стенок, релаксационные явления), которые можно эквивалентно представлять в виде инерционных звеньев в магнитной ветви [1]. Модели построения статических и динамических петель гистерезиса для электротехнических сталей, применяемые для расчёта потерь и фазовых эффектов, также рассматриваются в современной литературе [3]. В контексте асинхронной машины это означает, что при воздействии на статор не только токи, но и магнитный поток имеет конечное время установления; следовательно, в измеряемой задержке отклика ротора может присутствовать вклад динамики магнитной цепи. Эксперимент с электронной меткой направлен на выделение и устойчивую регистрацию этой задержки.

В последние годы наблюдается усиление требований к динамике и энергоэффективности электроприводов, что приводит к развитию как классических регуляторов (ПИ/PR<sup>1</sup>), так и предиктивных алгоритмов управления. В частности, в работе Bašić и соавт. рассмотрено предиктивное управление током (MPCC<sup>2</sup>) и показано, что учет насыщения и потерь в модели асинхронной машины способен улучшать качество управления, но повышает требования к адекватности параметров модели [4]. В задачах IFOC<sup>3</sup> ключевым параметром является постоянная времени ротора, чувствительная к изменению сопротивлений при нагреве. Nan и соавт. предложили онлайн-метод настройки этого параметра с использованием высокочастотной инъекции и MRAS<sup>4</sup>-оценивания, что подчеркивает важность экспериментальной верификации параметров ротора [5]. Для высокопроизводительных приводов растёт интерес к предиктивному управлению моментом. В работе Janisch и соавт. предложена высокопроизводительная стратегия MPTC<sup>5</sup> для индукционных машин, ориентированная на применение в электромобилях; при этом отмечается чувствительность предиктивных методов к ошибкам модели и задержкам измерения [6]. В отечественной литературе отдельное направление составляют исследования энергоэффективности и оптимизации режимов асинхронных двигателей. Так, Мартынов и соавт. оценивали влияние конструктивных решений обмотки статора на энергетические характеристики двигателя [7], а Цветков и соавт. рассматривали вопросы оптимизации векторного управления асинхронным двигателем с применением системы аналитического контроля [8]. В [9] приведены примеры имитационного моделирования режимов энергетических систем с использованием *MATLAB/Simulink*, а также исследования конструктивных решений электрических машин [10]. С аппаратной точки зрения для формирования опорного события и безопасного ввода сигнала в силовую цепь применяются распространенные компоненты: таймер NE555 [11] и оптрон TLP627 [12].

В инженерных задачах построения имитационных моделей востребованы методы параметризации схемы замещения по каталожным данным и программная реализация вычисления параметров, что показано в работе Дзюина и Дмитриевой [13]. Примеры построения моделей асинхронного двигателя для анализа пуска и переходных процессов приведены в статье Ольховатова и соавт. [14]. Таким образом, современная литература подтверждает, что учет динамики и задержек является важным условием как для классических контуров тока, так и для предиктивных методов, а значит необходимы воспроизводимые лабораторные процедуры измерения и верификации динамических параметров ротора.

<sup>1</sup> ПИ (PI (пропорционально-интегральный)) — пропорционально-интегральный регулятор, PR — пропорционально-резонансный регулятор;

<sup>2</sup> MPCC (предиктивное управление током, model predictive current control) — предиктивное управление током;

<sup>3</sup> IFOC (косвенное векторное управление по полю, indirect field-oriented control) — косвенное векторное управление по полю;

<sup>4</sup> MRAS (адаптивная система модели-эталона, model reference adaptive system) — адаптивная система модели-эталона;

<sup>5</sup> MPTC (предиктивное управление моментом, model predictive torque control) — предиктивное управление моментом.

Дополнительно отметим, что подходы к экспериментальной оценке переходных процессов и задержек в асинхронных машинах рассматривались в работах конференционного уровня [6], а также в прикладных исследованиях электроприводов для горных машин [11] и диагностике асинхронных двигателей по признакам повреждений обмоток [12]. Патентные решения по векторному управлению и структурам регуляторов подтверждают практическую востребованность учета внутренних динамических факторов [15].

**Материалы и методы (Materials and methods)**

В качестве объекта исследования выбран асинхронный двигатель лабораторного стенда типа IMM71 ( $P_n=370$  Вт;  $U_n=380/220$  В;  $I_n=1,37/2,37$  А;  $n_n=1370$  об/мин;  $\cos\varphi=0,7$ ;  $p=2$ ). Эксперимент выполнялся в режиме заторможенного ротора ( $s=1$ ), что позволяет минимизировать влияние механической инерции и сосредоточиться на электромагнитной динамике. В фазу статора вводилась прямоугольная метка (электронный импульс), которая использовалась как опорное событие для синхронизации осциллограмм и измерения запаздывания отклика ротора.

Для теоретического обоснования вводится представление о конечном времени установления магнитных процессов. Ф. Блох предложил феноменологические уравнения, описывающие динамику вектора намагниченности  $M(t)$  с учётом релаксации к равновесию (постоянные времени  $T1$  и  $T2$ ) [2]. В компонентной форме они записываются как:

$$\begin{aligned} \frac{dM_x}{dt} &= \gamma(M_y B_z - M_z B_y) - \frac{M_x}{T_2} \\ \frac{dM_y}{dt} &= \gamma(M_z B_x - M_x B_z) - \frac{M_y}{T_2} \\ \frac{dM_z}{dt} &= \gamma(M_x B_y - M_y B_x) - \frac{M_z - M_0}{T_1} \end{aligned}$$

где  $M_x, M_y, M_z$  - компоненты магнитного момента,  $B_x, B_y, B_z$  - компоненты магнитного поля,  $\gamma$  - гиромагнитное отношение,  $T1$  и  $T2$  - времена поперечной и продольной релаксации соответственно,  $M_0$  - равновесный магнитный момент

Для инженерной интерпретации низкочастотного перемагничивания удобно использовать релаксационное приближение первого порядка (без детализации прецессии):

$$\frac{dM}{dt} + \frac{1}{\tau_m} M = \frac{1}{\tau_m} Meq(H)$$

где  $\tau_m$  — эффективное время установления магнитного состояния, включающее вклад вихрековых и релаксационных процессов в стали [1, 3]. Для гармонического воздействия частоты  $\omega$  такая модель даёт фазовый сдвиг

$$|\varphi_m| = \arctan(\omega * \tau_m)$$

и эквивалентное запаздывание

$$\Delta t_m = |\varphi_m|/\omega$$

Чтобы интерпретировать измеренную задержку, далее используется разложение по вкладам. В общем виде измеряемая задержка  $\Delta t_{общ}$  может быть представлена как сумма

$$\Delta t_{общ} = \Delta t_r + \Delta t_m + \Delta t_{изм}$$

где  $\Delta t_r$  связано с электромагнитной динамикой роторной цепи (эквивалентная  $\tau_r$ ),  $\Delta t_m$  — вклад динамики магнитной цепи (эффективная  $\tau_m$ ), а  $\Delta t_{изм}$  — вклад измерительного тракта (каналы осциллографа, щупы, фильтрация). Практически  $\Delta t_{изм}$  оценивается калибровкой (подачей одного и того же импульса на оба канала). Для приближённого отделения  $\Delta t_r$  и  $\Delta t_m$  полезны два приёма: (а) сравнение задержки между меткой и током статора (как быстрым электрическим откликом) и задержки между меткой и током ротора; (б) изменение сопротивления внешней цепи ротора (добавочного сопротивления) при фиксированных параметрах магнитной цепи. Оценка  $\tau$  из фазового эквивалента может выполняться по соотношению

$$\tau = \frac{\tan(|\varphi|)}{2\pi f}, \#(1)$$

соответствующему модели первого порядка; при наличии заметного вклада магнитной цепи эта оценка отражает суммарный эффект и требует валидации серией опытов и сопоставлением с моделью. Оценка  $\tau$ , рассчитанная по (1), справедлива при аппроксимации динамики объекта моделью первого порядка (апериодическое звено) и при предположении, что фазовый сдвиг обусловлен одной доминирующей постоянной времени. В реальной асинхронной машине измеряемый сдвиг может включать вклад динамики более высокого порядка (дополнительные полюса), а также чистой задержки измерительного тракта и процессов в магнитной цепи. Поэтому  $\tau$ , определённая по (1), является эффективной (эквивалентной) оценкой и может иметь методическую погрешность. Ожидаемая

методическая погрешность такого упрощения, как правило, не превышает 10–20% и не влияет на качественный вывод о наличии задержки миллисекундного порядка.

Схемные и осциллографические материалы, поясняющие реализацию метки и процедуру измерений, приведены на рисунках 1–5.

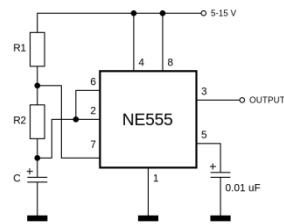


Рис. 1. Схема генератора прямоугольных импульсов (NE555)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

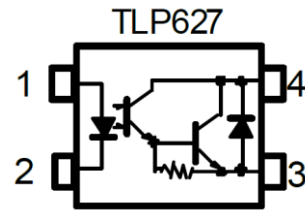


Рис. 2. Схема оптронной развязки (TLP627)

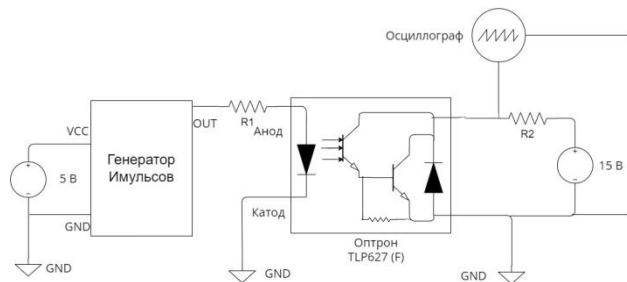


Рис. 3. Схема опыта (ввод метки в цепь статора в точке подключения осциллографа, регистрация сигналов)

Fig. 3. Experimental setup

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

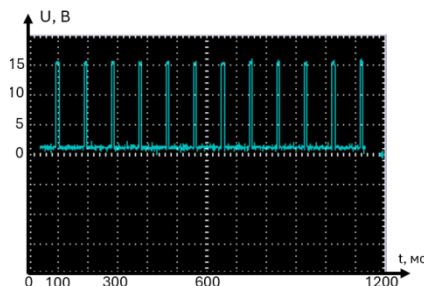


Рис. 4. Сигнал на осциллографе при автономной проверке узла метки

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

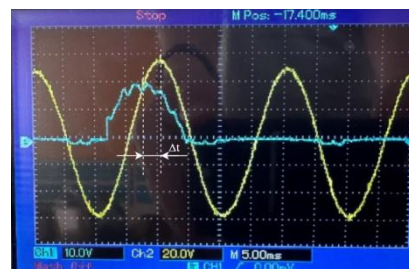


Рис. 5. Сигнал осциллографа при подключении электронной метки к цепи статора (50 Гц)

Интерпретация задержки с позиции инерционности магнитной цепи. Измеренная задержка  $\Delta t \approx 2.2\text{--}2.5$  мс отражает суммарный эффект: (а) г–L динамику роторной цепи, (b) конечную скорость установления потокосцепления из-за динамики магнитной цепи (вихревые токи и релаксация), (с) задержки измерительного тракта. Синяя кривая – это цепь ротора с учетом подмешивания импульса электронной метки, желтая – это цепь ротора. Для оценки вклада измерительного тракта рекомендуется предварительно выполнить калибровку каналов осциллографа на одном и том же сигнале и учесть систематический фазовый сдвиг каналов. Экспериментальная межканальная калибровка ( $\Delta t_{cal}$ ) не была зафиксирована отдельной серией измерений, поэтому численное значение  $\Delta t_{cal}$  не приведено. Вместе с тем вклад собственно осциллографа UTD2052CL в измерение временных интервалов ограничен паспортной точностью измерения  $\Delta T$ :  $\pm(T_s + 50 \text{ ppm} \cdot \Delta T + 0.4 \text{ ns})$ . Для  $\Delta T \approx 2\text{--}3$  мс компонент  $50 \text{ ppm} \cdot \Delta T$  составляет порядка  $0.1\text{--}0.15$  мкс, что существенно меньше измеряемой задержки миллисекундного уровня. Задержка, вносимая кабелями щупов имеет порядок  $5\text{--}7$  нс; при использовании одинаковых щупов на обоих каналах эта задержка в основном взаимно компенсируется, а остаётся лишь разностный вклад (skew) из-за различий трактов.

Для подтверждения устойчивости результата целесообразно проводить серию измерений при одинаковых условиях (напряжение, схема включения, режим  $s=1$ ) и оценивать среднее значение  $\Delta t$  и стандартное отклонение. Дополнительно можно исследовать влияние параметров внешней цепи ротора (например, добавочного сопротивления) на измеряемую задержку.

Пример расчёта параметров по измеренной задержке. Для иллюстрации пересчёта приведём пример: при  $\Delta t=2.4$  мс и  $f=50$  Гц фазовый эквивалент составляет  $\varphi = 360 \cdot f \cdot \Delta t \approx 43.2^\circ$ . По формуле (1) получаем  $\tau \approx 3.0$  мс. Эта величина сопоставима с ожидаемыми постоянными времени для машин малой мощности и может использоваться как ориентир при настройке наблюдателей и токовых контуров. Чувствительность к параметрам режима. Ожидается, что при изменении напряжения/частоты питающей сети и степени насыщения магнитной системы может изменяться вклад  $\Delta t_m$ . Поэтому перспективным является проведение опытов при нескольких значениях напряжения (в пределах допустимого) и, при наличии ПЧ, при нескольких частотах, что позволит отделить эффекты г–L динамики ротора от частотно-зависимых магнитных явлений. Полученная задержка может быть использована как экспериментальный критерий адекватности модели: после параметризации схемы замещения модель должна воспроизводить не только установившиеся токи, но и величину  $\Delta t$  при импульсном воздействии. Если модель без учёта динамики магнитной цепи систематически занижает задержку, это является аргументом в пользу введения дополнительного инерционного элемента в магнитной ветви.

**Результаты (Results)**

В ходе автономной отладки подтверждена устойчивость прямоугольных импульсов электронной метки: фронты отчётливо выделяются, амплитуда достаточна для уверенного триггирования. После подключения к цепи статора метка сохраняет идентифицируемую форму поверх синусоидального напряжения 50 Гц, что позволяет использовать её как однозначное опорное событие. В режиме заторможенного ротора по осциллограммам получена оценка задержки отклика ротора относительно метки порядка  $40-45^\circ$ , что эквивалентно  $\Delta t \approx 2.2-2.5$  мс при  $f=50$  Гц. При пересчёте по модели первого порядка это соответствует ориентировочной постоянной времени  $\tau \approx 2.7-3.2$  мс. По сравнению с измерениями без опорного импульса разброс оценок уменьшается, так как исключается неопределённость выбора момента отсчёта.

Количественные оценки задержки и производных параметров сведены в таблицу 1. Для расширения экспериментальной базы и отделения вкладов роторной и магнитной инерционности предложен план серии опытов (табл. 2).

Таблица 1  
Table 1

Результаты оценки задержки тока ротора  
The results of the evaluation of the rotor current delay

Показатель	Значение	Примечание
Фазовый эквивалент задержки $\varphi$	$40-45^\circ$	оценка по осциллограммам
Эквивалентное время $\Delta t$ при 50 Гц	2.2–2.5 мс	$\Delta t = \varphi / (360 \cdot 50)$
Ориентировочная $\tau$	2.7–3.2 мс	$\tau \approx \tan( \varphi ) / (2\pi \cdot 50)$

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Таблица 2  
Table 2

План серии экспериментов для оценки вклада роторной и магнитной инерционности  
A plan for a series of experiments to evaluate the contribution of rotary and magnetic inertia

Фактор	Уровни	Ожидаемый эффект
Режим скольжения	$s=1$ (заторм.); $s<1$ (ном.)	меняется вклад $\Delta t_r$
Напряжение сети	0.8–1.0 $U_n$	влияние насыщения на $\Delta t_m$
Частота (при наличии ПЧ)	25/50/75 Гц	частотная зависимость потерь и $\varphi_m$
Добавочное R ротора	0; $R_{доп1}$ ; $R_{доп2}$	изменяется $\tau_r \rightarrow \Delta t_r$
Ток статора (эквивалентная нагрузка)	холостой/под нагрузкой	изменяется магнитный поток
Повторы опыта	$N \geq 5$	оценка $\sigma(\Delta t)$ и доверительных интервалов
Калибровка каналов	до/после серии	оценка $\Delta t$ изм

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Выполненные измерения показали, что электронная метка устойчиво регистрируется как на тестовой нагрузке, так и при подмешивании в фазу статора на фоне сетевого напряжения 50 Гц. Это обеспечивает однозначную синхронизацию каналов при осциллографировании и позволяет воспроизводимо оценивать временной сдвиг между опорным событием и реакцией ротора.

#### **Обсуждение (Discussions)**

Интерпретация измеренной задержки должна учитывать, что она является суммарной:  $\Delta t_{\text{общ}}$  складывается из вклада электромагнитной динамики роторной цепи ( $\Delta t_r$ ), динамики магнитной цепи ( $\Delta t_m$ ) и измерительного тракта ( $\Delta t_{\text{изм}}$ ). Роторный вклад связан с  $r$ - $L$ -инерционностью и конечной скоростью нарастания токов при  $s=1$ , а вклад магнитной цепи обусловлен тем, что потокосцепление не устанавливается мгновенно из-за вихревых и релаксационных процессов в стали; в инженерной форме это можно представлять как релаксационное звено с эффективным временем  $t_m$ , согласующееся с подходом релаксационных уравнений (в том числе в духе уравнений Блоха) и современных моделей потерь и гистерезиса магнитных сердечников. Таким образом, электронная метка выступает экспериментальным триггером, позволяющим измерить именно временной сдвиг отклика и связать его с параметрами модели.

С практической точки зрения полученная оценка задержки важна при настройке токового контура: увеличение полосы пропускания без учёта суммарной инерционности ( $t_r+t_m$ ) и задержек измерения/вычисления снижает фазовый запас и повышает риск перерегулирования. Поэтому результат рекомендуется использовать как критерий валидации имитационной модели (модель должна воспроизводить  $\Delta t$  при том же режиме) и как ограничение «реалистичной» настройки регулятора. Дальнейшая работа должна включать серию опытов по таблице 2 (изменение добавочного сопротивления ротора, напряжения/частоты при наличии ПЧ, повторяемость), калибровку  $\Delta t_{\text{изм}}$  и сопоставление с моделью, где динамика магнитной цепи учитывается через потери/гистерезис или эквивалентное инерционное звено.

Сопоставляя полученную интерпретацию с современной литературой, отметим следующее. Во-первых, в работах по моделям потерь в магнитных сердечниках и динамической гистерезисной зависимости подчёркивается, что частотно-зависимые механизмы (вихревые токи, релаксация доменной структуры, аномальные потери) приводят к фазовому сдвигу между  $H$  и  $B$  и могут быть эквивалентно представлены инерционными звеньями в магнитной ветви. Это согласуется с введением эффективного  $t_m$  при интерпретации задержки [1, 3]. Во-вторых, сама идея конечного времени релаксации как причины «неуспехов» магнитной подсистемы за воздействием соответствует феноменологической постановке уравнений Блоха и их инженерному релаксационному приближению, используемому в методике настоящей работы [2]. Следовательно, измерение  $\Delta t$  с помощью электронной метки может рассматриваться как практический тест адекватности выбранного уровня детализации модели магнитной цепи.

Ограничения проведённого исследования и направления улучшения методики связаны, прежде всего, с точностью измерения и зависимостью результата от режима. К систематическим факторам относятся возможный фазовый сдвиг измерительных каналов и влияние цепи ввода метки; к случайным — шум контактных колец и наводки. Рекомендуется обязательная калибровка каналов осциллографа на одном и том же импульсе, выполнение серии повторов с оценкой среднего и разброса  $\Delta t$ , а также проверка чувствительности результата к добавочному сопротивлению ротора и уровню насыщения (изменение напряжения/частоты при наличии ПЧ).

#### **Заключение (Conclusions)**

Разработан и экспериментально апробирован способ измерения электромагнитной задержки в асинхронной машине на основе электронной метки. Метка формируется генератором импульсов на таймере NE555 и вводится в цепь статора через оптронную развязку, что обеспечивает безопасную регистрацию опорного события и воспроизводимость измерений на фоне сетевого напряжения 50 Гц.

Показано, что использование метки позволяет синхронизировать осциллограммы и оценивать временной сдвиг между воздействием на статор и откликом ротора в режиме заторможенного ротора. Полученные экспериментальные оценки задержки имеют миллисекундный порядок и согласуются с представлением о конечной скорости установления электромагнитных процессов в роторной и магнитной цепях.

Предложена интерпретация измеренной задержки как суммарного эффекта, включающего вклад роторной цепи, динамики магнитной цепи и измерительного тракта. Это позволяет использовать измерение задержки как критерий верификации имитационной

модели и как практическое ограничение при настройке быстродействующих токовых контуров в системах векторного управления.

#### Литература

1. Rodriguez-Sotelo D., Rodriguez-Licea M.A., Araujo-Vargas I., Prado-Olivarez J., Barranco-Gutiérrez A.-I., Perez-Pinal F.J. Power Losses Models for Magnetic Cores: A Review // *Micromachines*. 2022. Т. 13. № 3. Ст. 418. doi:10.3390/mi13030418.
2. Bloch F. Nuclear Induction // *Physical Review*. 1946. Т. 70. № 7–8. С. 460–474.
3. Hamzehbahmani H., Anderson P.I. Static hysteresis modeling for grain-oriented electrical steels for dynamic modeling // *Journal of Applied Physics*. 2021. Т. 130. Ст. 055102. doi:10.1063/5.0058554.
4. Bašić M., Vukadinović D., Grgić I. Model Predictive Current Control of an Induction Motor Considering Iron Core Losses and Saturation // *Processes*. 2023. Т. 11. № 10. Ст. 2917. doi:10.3390/pr11102917.
5. Han Y., et al. Robust Online Rotor Time Constant Tuning Method with High-Frequency Current Injection for Indirect Field-Oriented Induction Motor Drives // *Symmetry*. 2025. Т. 17. № 10. Ст. 1729. doi:10.3390/sym17101729.
6. Janisch G., Kugi A., Kemmetmüller W. A high-performance model predictive torque control concept for induction machines for electric vehicle applications // *Control Engineering Practice*. 2024. Т. 153. Ст. 106128. doi:10.1016/j.conengprac.2024.106128.
7. Мартынов К.В., Пантелеева Л.А., Благодатских И.А. Оценка энергетических характеристик асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2021. Т. 23. № 6. С. 109–118. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-109-118.
8. Цветков А.Н., Доан Н.Ш., Ярославский Д.А. Исследования по оптимизации векторного управления асинхронным двигателем с применением системы аналитического контроля // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т. 24. № 3. С. 144–157. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-144-157.
9. Исмоилов И.И., Грачева Е.И. Повышение управляемости энергетическими системами и улучшение качества электроэнергии // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2022. Т. 14. № 1 (53). С. 3–12.
10. Сафин А.Р., Грачева Е.И., Vehera R.K., Петров Т.И. Использование ферритовых магнитов в синхронных двигателях с постоянными магнитами // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2022. Т. 14. № 1 (53). С. 47–55.
11. Texas Instruments. NE555 Precision Timers. Datasheet. Доступно по: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf> (дата обращения: 31.01.2026).
12. Toshiba. TLP627, TLP627-2, TLP627-4 Photocouplers. Datasheet. Доступно по: <https://www.farnell.com/datasheets/2007824.pdf> (дата обращения: 31.01.2026).
13. Дзюин Д.В., Дмитриева В.В. Разработка программы расчета параметров схемы замещения трехфазного асинхронного электродвигателя // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2024. № 3. С. 84–92. doi:10.30987/2658-6436-2024-3-84-92.
14. Ольховатов Д.В., Гребенников Н.В., Шевкунова А.В. Синтез электропривода компрессорной установки электровоза // *Транспортное машиностроение*. 2024. № 5. С. 40–49. doi:10.30987/2782-5957-2024-5-40-49.
15. Устройство управления вектором асинхронного электропривода. Патент РФ RU 2392732 С1. Оpubл. 20.06.2010. Доступно по: <https://patents.google.com/patent/RU2392732C1/ru> (дата обращения: 31.01.2026).

#### Авторы публикации

**Головин Максим Михайлович** – аспирант (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. Email: [golovin.maksim.m@gmail.com](mailto:golovin.maksim.m@gmail.com).

**Портнягин Николай Николаевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0001-6073-9884>. Email: [pornic1@yandex.ru](mailto:pornic1@yandex.ru).

#### References

1. Rodriguez-Sotelo D, Rodriguez-Licea MA, Araujo-Vargas I, et al. Power Losses Models for Magnetic Cores: A Review. *Micromachines*. 2022;13(3):418. doi:10.3390/mi13030418.

2. Bloch F. Nuclear Induction. *Physical Review*. 1946;70(7-8):460-474.
3. Hamzehbahmani H, Anderson PI. Static hysteresis modeling for grain-oriented electrical steels for dynamic modeling. *Journal of Applied Physics*. 2021;130:055102. doi:10.1063/5.0058554.
4. Bašić M, Vukadinović D, Grgić I. Model Predictive Current Control of an Induction Motor Considering Iron Core Losses and Saturation. *Processes*. 2023;11(10):2917. doi:10.3390/pr11102917.
5. Han Y, et al. Robust Online Rotor Time Constant Tuning Method with High-Frequency Current Injection for Indirect Field-Oriented Induction Motor Drives. *Symmetry*. 2025;17(10):1729. doi:10.3390/sym17101729.
6. Janisch G, Kugi A, Kemmetmüller W. A high-performance model predictive torque control concept for induction machines for electric vehicle applications. *Control Engineering Practice*. 2024;153:106128. doi:10.1016/j.conengprac.2024.106128.
7. Martynov KV, Panteleeva LA, Blagodatskikh IA. Otsenka energeticheskikh kharakteristik asinkhronnogo dvigatelya s sovmeshchennoy obmotkoy [Estimation of energy characteristics of an induction motor with a combined winding]. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021;23(6):109-118. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-109-118.
8. Tsvetkov AN, Doan NS, Yaroslavsky DA. Issledovaniya po optimizatsii vektornogo upravleniya asinkhronnym dvigatelem s primeneniem sistemy analiticheskogo kontrolya [Research on optimization of vector control of an asynchronous motor using an analytical control system]. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2022;24(3):144-157. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-144-157.
9. Ismoilov II, Gracheva EI. Povyshenie upravlyaemosti ehnergeticheskimi sistemami i uluchshenie kachestva ehlektroehnergii [Improving controllability of power systems and electric power quality]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2022;14(1(53)):3-12. (In Russ).
10. Safin AR, Gracheva EI, Behera RK, Petrov TI. Ispol'zovanie ferritovykh magnitov v sinkhronnykh dvigatelyakh s postoyannymi magnitami [Using ferrite magnets in permanent-magnet synchronous motors]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2022;14(1(53)):47-55. (In Russ).
11. Texas Instruments. NE555 Precision Timers. Datasheet. Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf>. Accessed: 31 Jan 2026.
12. Toshiba. TLP627, TLP627-2, TLP627-4 Photocouplers. Datasheet. Available at: <https://www.farnell.com/datasheets/2007824.pdf>. Accessed: 31 Jan 2026.
13. Dzyuin DV, Dmitrieva VV. Razrabotka programmy rascheta parametrov skhemy zameshcheniya trekhfaznogo asinkhronnogo ehlektrodvigatelya [Development of a program for calculating the equivalent circuit parameters of a three-phase induction motor]. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii*. 2024;(3):84-92. (In Russ). doi:10.30987/2658-6436-2024-3-84-92.
14. Olkhovtov DV, Grebennikov NV, Shevkunova AV. Sintez ehlektroprivoda kompressornoy ustanovki ehlektrovoza [Synthesis of an electric drive for an electric locomotive compressor unit]. *Transportnoe mashinostroenie*. 2024;(5):40-49. (In Russ). doi:10.30987/2782-5957-2024-5-40-49.
15. Ustroistvo upravleniya vektorom asinkhronnogo ehlektroprivoda [Vector control device for induction drive]. Patent RUS RU 2392732 C1. Publ. 20 Jun 2010. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2392732C1/ru>. Accessed: 31 Jan 2026. (In Russ).

#### **Authors of the publication**

**Maksim M. Golovin** – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. Email: [golovin.maksim.m@gmail.com](mailto:golovin.maksim.m@gmail.com).

**Nikolay N. Portnyagin** – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0001-6073-9884>. Email: [pornic1@yandex.ru](mailto:pornic1@yandex.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы*

**Получено** **01.04.2026 г.**

**Отредактировано** **14.04.2026 г.**

**Принято** **06.05.2026 г.**