

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА

Фролов М.Ю.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
myu.frolov@gmail.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке методики настройки фильтра Калмана для задач автоматического управления режимом работы синхронного генератора при отсутствии возможности прямого измерения всех необходимых для этого величин, что позволяет синтезировать оптимальные и адаптивные регуляторы. ЦЕЛЬ. Определить подход к настройке фильтра Калмана для задач управления режимом синхронного генератора. Определить качество фильтрации выходных параметров и оценки неизмеряемых режимных параметров в условиях возмущающих воздействий на входе и шума в измерительных каналах. МЕТОДЫ. При решении поставленной цели применялись методы математического моделирования, реализованные средствами MatLab/Simulink. Использовались методы математической статистики и оптимизации. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описан метод настройки фильтра Калмана, который позволяет определить вектор переменных состояния без линеаризации модели синхронного генератора. Проведено исследование влияния компонентов матриц спектральных плотностей Q и R на качество фильтрации и оценки состояния режимных параметров на примере угла поворота ротора и скорости вращения. Для исследования была создана цифровая модель с синхронным генератором из стандартной библиотеки MatLab/Simulink и с генератором в пространстве состояний. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Установлено, что, изменяя компоненты матриц Q и R фильтра, можно влиять на скорость схождения оцененных параметров к истинным значениям. Если компоненты этих матриц равны мощностям спектральных плотностей возмущающих воздействий и шумов в измерительных каналах, то ошибка оценивания будет стремиться к нулю. По результатам экспериментов было установлено, что такой же результат достигается, если компоненты матриц Q и R не равны мощностям спектральных плотностей возмущений и помех, но при этом между компонентами матриц Q и R должна сохраняться также пропорция, что и при их формировании вышеупомянутым способом.

Ключевые слова: фильтр Калмана; форма вход-состояние-выход; уравнение движения ротора; наблюдатель Люенбергера; линейно-квадратичный наблюдатель.

Для цитирования: Фролов М.Ю. Оценка состояния режимных параметров синхронного генератора на основе фильтра Калмана // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 94-103. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-94-103.

STATE ESTIMATION OF SYNCHRONOUS GENERATOR MODE PARAMETERS BASED ON KALMAN FILTER

Frolov M.Yu.

Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia
myu.frolov@gmail.com

Abstract: RELEVANCE of the research is to develop a methodology for the Kalman filter tuning for the problem of synchronous generator control in the operation mode. This allows us to synthesize optimal and adaptive controllers. The complication consists in the absence of the possibility of direct measurement of all the necessary quantities. THE PURPOSE. To determine the approach of Kalman filter tuning for the control problems in the operating mode of a synchronous generator. To determine the filtering quality of the output signals and estimation of

the operating parameters with disturbance in the input channels and noise in the measuring ones. **METHODS.** To achieve the aim, the methods of mathematical modeling implemented by MatLab/Simulink tools were used. The methods of mathematical statistics and optimization were used. **RESULTS.** The paper describes the algorithm for Kalman filter tuning that allows to determine the vector of state variables without linearizing the synchronous generator model. The research was conducted on the influence of noise covariance matrix Q and R for quality filtration and parameters estimation of rotor angle and speed. For the research, a digital model with a synchronous generator from the MatLab/Simulink library was designed and another one was designed with a generator in the state space. **CONCLUSION.** It has been established that matrices Q and R influence on the speed of movement of the estimated parameters by the true values. If the matrices components are equal the power spectral densities of the disturbances and noise in these measuring channels, the measurement error will tend for zero. The same result is obtained if the components of the Q and R matrices do not have the necessary power spectral densities of disturbances and noise, but at the same time, between the components of the Q and R matrices, it is necessary to maintain the same proportion as when they are created by the above-mentioned method.

Keywords: Kalman filter; state space representation; rotor motion equation; Luenberger observer; linear quadratic estimator.

For citation: Frolov M.Yu. State estimation of synchronous generator mode parameters based on Kalman filter. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (4): 94-103. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-94-103.

Введение (Introduction)

Синхронная машина характеризуется большим количеством переменных величин, такие как: токи, напряжения, мощности скорости и т.д. При составлении математических моделей таких объектов для задач управления принято разделять переменные на несколько категорий:

- входные сигналы $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$;
- выходные сигналы $y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$;
- переменные состояния $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$;
- внешние возмущения f и помехи измерений ζ .

Переменные состояния обычно не измеряются, поэтому возникает задача оценки состояния, которая формулируется следующим образом. По известным, наблюдаемым входным и выходным сигналам, а также известным параметрам и структуре модели определить (оценить) вектор переменных состояния x . Например, на крупных электростанциях датчики угла ротора и скорости генератора обычно не устанавливаются.

Переменные состояния могут быть использованы в оптимальных, самонастраивающихся и адаптивных системах управления, поэтому существует несколько подходов для оценки состояния динамических объектов, один из которых состоит в построении наблюдателя. Устройство, формирующее на выходе вектор оценки состояния, называется наблюдателем (наблюдатель Люенбергера) [1]. Наблюдатель, способный отделять полезный сигнал от помех, называется фильтром.

Существует множество подходов к синтезу наблюдателей:

- модальный наблюдатель на основе решения уравнения Сильвестра [2, 3];
- наблюдатель на основе решения неравенства Ляпунова LMI (linear matrix inequalities) [4, 5];
- Линейные квадратичные наблюдатели (синтез по интегрально-квадратичному критерию) (linear quadratic estimator) LQE [6];
- Фильтр Калмана и его модификации. (Расширенный фильтр Калмана ЕФК [7-10], без запаха Unscented UFK (он же сигма-точечный) [9-11], и т.д. [12, 13]).

По определённым причинам наибольшую популярность получил Фильтр Калмана. Во-первых, он позволяет получить наилучшие результаты при зашумлённых сигналах измерения. Во-вторых, при совместном использовании Фильтра Калмана с линейно-квадратичным регулятором (linear quadratic regulator, LQR) [14, 15] можно решить задачу о линейно-квадратичном гауссовском управлении (linear quadratic Gaussian, LQG) [16, 17]. То есть синтезировать оптимальный регулятор по интегрально-квадратичному критерию на основании известной математической модели объекта управления и измеренным входным и выходным величинам.

В самом общем случае задача фильтрации по Калману может быть сформулирована для нелинейных нестационарных объектов при наличии коррелированного случайного процесса, но большинство исследователей рассматривают задачу оценивания, сформулированную в пространстве состояний для линейного стационарного объекта при наличии белого шума.

Математические модели, построенные на основе полных уравнений Парка-Горева, и уравнения движения ротора являются нелинейными, что создаёт трудности для построения систем регулирования. Часть исследователей производят линеаризацию модели и используют классический фильтр Калмана, что может привести к значительной ошибке оценивания при значительных изменениях режима. Часто используется расширенный фильтр Калмана, который подразумевает линеаризацию в каждый момент времени. Для его работы необходимо с течением времени пересчитывать Якобиан на каждом интервале, что может требовать больших вычислительных мощностей.

Набирает популярность вариация под англоязычным названием «Unscented filter Kalman», в русскоязычной литературе нет устоявшегося перевода. Используют дословный перевод фильтр Калмана «без запаха» или сигма-точный фильтр Калмана. В этом варианте строится приближение распределения плотности вероятности случайной величины после прохождения через нелинейное преобразование. Такой подход позволяет работать с резко нелинейными функциями, однако также может привести к большим затратам вычислительных мощностей.

Для определения таких параметров как угол поворота ротора генератора и скорость вращения ротора использование сложных модификаций Фильтра Калмана не обязательна, поэтому в данной статье будет использован обычный вариант фильтра Калмана. Это станет возможно благодаря тому, что за входной сигнал принимается сумма моментов на валу машины. Тем самым уравнение движения ротора будет считаться линейным, стационарным.

Стоит отметить, что для решения задачи оценивания чаще всего используют модели в дискретном исчислении [5]. В статье задача решается для непрерывных функций, тем самым количество математических преобразований сведено к минимуму.

Основная цель исследования состоит в разработке метода настройки фильтра Калмана для оценки параметров состояния синхронного генератора. Для достижения поставленной цели разработан принцип формирования матриц спектральных плотностей фильтра Калмана. Для исследования предложенного метода была создана модель в MATLAB/Simulink. Наиболее важные результаты: предложен метод настройки фильтра Калмана, который позволяет добиться минимальной погрешности оценки режимных параметров; особенности метода позволяют использовать линейную модель синхронной машины без процедуры линеаризации; объяснено влияние матриц спектральных плотностей на скорость и достоверность оценки переменных состояния. Значимость полученных результатов состоит в том, что предложенный метод можно внедрить в систему автоматического регулирования синхронной машиной.

Материалы и методы (Materials and methods)

А. Математическая модель машины как объект оценки состояния

Для проведения исследования в качестве модели синхронной машины выбрана следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega \\ T_j \dot{\omega} + K_d \omega = M_{mech} - M_{el} = \Delta M \end{cases} \quad (1)$$

где θ – угол поворота ротора; ω [рад/с] – угловая скорость ротора; T_j , [с] – постоянная инерции синхронного генератора; K_d – коэффициент трения M_{mech} [о.е.] – механический момент турбины; M_{el} [о.е.] – электромагнитный момент генератора; ΔM – сумма моментов на валу ротора генератора.

В системе (1) первое уравнение устанавливает связь между углом поворота и скоростью вращения ротора. Второе – уравнение движения ротора, которое описывает равноускоренное движение ротора при возникновении небаланса моментов на валу. Относительно угла и скорости система (1) состоит из дифференциальных уравнений первого порядка, что позволяет легко перейти к матричной форме записи:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_d}{T_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_j} \end{bmatrix} \Delta M$$

Полученное матричное уравнение называется уравнением состояния.

Предполагается, что для измерения доступен только угол поворота ротора, поэтому необходимо дополнить модель уравнение наблюдения:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix}$$

Введём обозначения:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-K_d}{T_j} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ T_j \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix}, u = \Delta M$$

В свёрнутом виде модель выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (2)$$

Система (2) называется моделью или системой уравнений в пространстве состояния. В (2) вектор столбец x – вектор состояния, который характеризует состояние системы в определённый момент времени. Понятие состояние введено Калманом в середине XX века [1]. Остальные составляющие системы (2): A – квадратная матрица состояния размерностью 2×2 ; B – матрица управления размерностью 2×1 ; C – матрица наблюдения размерностью 2×1 ; u – вектор управления (входов) размерностью 1×1 ; y – вектор наблюдений (выходов) размерностью 1×1 и состоит только из угла θ .

В канал управления может вмешиваться внешнее возмущение f , а в измерительный канал помеха измерений ξ , что может отрицательно влиять на адекватность системы управления. При помехах значительной величины необходимо дополнить модель объекта следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + f \\ y = Cx + \xi \end{cases} \quad (3)$$

В частном случае f и ξ могут являться неизвестными детерминированными сигналами, но при постановке задачи для фильтра Калмана они считаются случайными неизвестными сигналами, которые не могут быть непосредственно измеренными.

Б. Оценка параметров фильтром линейно-квадратичным наблюдателем и Калмана

Математическое описание линейно-квадратичного наблюдателя и Фильтра Калмана основывается на уравнениях наблюдателя и описывается следующими матричными уравнениями.

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(\hat{y} - y) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (4)$$

$\hat{x}$ – оценка вектора состояния;

$\hat{y}$ – оценка вектора наблюдений;

L – матрица наблюдателя.

Матрицы A , B , C абсолютно такие же, как у объекта генератора, поэтому, чтобы воспользоваться фильтром Калмана, необходимо знать параметры генератора. Определить их можно либо из паспортных данных, либо методами идентификации, например, методом наименьших квадратов [18].

Постановка задачи о *линейно-квадратичном наблюдателе*: найти матрицу L наблюдателя, при которой $\hat{x}$ точно сходится к x , если посторонние сигналы f и ξ таковы, что критерий доверия

$$J = \int_{-\infty}^t (f^T Q^{-1} f + \xi^T R^{-1} \xi) dt \quad (5)$$

принимает наименьшее возможное значение при данном выходе $y(t)$.

Известно, что найти матрицы Q и R , при которых критерий (5) будет минимальным, можно, решив алгебраическое уравнение Риккати (первое уравнение в системе (6)). Затем можно определить матрицу L (второе уравнение в системе (6)).

$$\begin{cases} AP + PA^T + Q - PC^T R^{-1} CP = 0 \\ L = -PC^T R^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

В ходе решения системы уравнений необходимо найти матрицы P , L .

Если $Q \succeq 0$ (Q положительно полуопределённая матрица), $R \succ 0$ (R положительно определённая матрица), пара (C, A) обнаруживаема, пара (A, B) стабилизируема, то из всех решений уравнения Риккати только одно положительно определено и динамика ошибки соответствующего наблюдателя асимптотически устойчива. Состояние $\hat{x}$, такого наблюдателя будет с нулевой ошибкой сходиться к состоянию x объекта при условии, что посторонние сигналы f и ξ минимизируют критерий доверия и при этом не противоречат

измеряемому сигналу $y(t)$.

Постановка задачи о Фильтре Калмана: найти матрицу L наблюдателя такую, что $\hat{x}$ точно сходится к x при этом средний квадрат отклонения, установившийся ошибки наблюдателя

$$\lim_{t \rightarrow \infty} M \left(\|x(t) - \hat{x}(t)\|^2 \right)$$

примет наименьшее возможное значение.

В этом случае для рассматриваемой модели фильтра фактически решается задача оптимальной фильтрации, при которой оптимальный коэффициент усиления наблюдателя (матрица наблюдателя) определяется выражением

$$L = -PC^T R^{-1},$$

где P – уникальное положительно-полуопределенное решение алгебраического уравнения Риккати

$$AP + PA^T + Q - PC^T R^{-1} CP = 0,$$

где матрицы Q и R свою очередь определяются, исходя из критерия доверия.

$$J = \int_{-\infty}^t (f^T Q^{-1} f + \xi^T R^{-1} \xi) dt$$

Здесь возмущение f и помеха ξ являются гауссовским белым шумом (случайные процессы с нулевым математическим ожиданием и равномерной спектральной плотностью);

Q и R – это матрицы спектральных плотностей этих сигналов;

δ – дельта функция;

M – математическое ожидание.

Если компоненты f независимы, то Q будет диагональной. Если компоненты ξ независимы, то R будет диагональной.

Найти матрицу L наблюдателя для фильтра Калмана из тоже самой системы (6), что и для линейно-квадратичного наблюдателя, только тут матрицы Q и R это матрицы спектральных плотностей сигналов f и ξ .

Чтобы синтезировать линейно-квадратичный наблюдатель или фильтр Калмана необходимо:

1. Выбрать $Q \geq 0$ и $R > 0$ так, чтобы они отражали распределение доверия между тем, что рассчитывает наблюдатель, и тем, что сообщают датчики

2. Найти решение $P > 0$ уравнение Риккати $AP + PA^T + Q - PC^T R^{-1} CP = 0$

3. Вычислить L по формуле $L = -PC^T R^{-1}$.

Далее в статье будет показано, что для достижения наилучшего результата матрицы Q и R нужно брать таким образом, чтобы они являлись матрицами спектральных плотностей f и ξ .

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Для проведения исследований в программном комплексе MATLAB Simulink была собрана модель (рис. 1).

Модель состоит из трёх частей. Первая часть «Power system» – это небольшая электрическая система, состоящая из синхронного генератора 200 МВА 13,8 кВ, работающего на нагрузку 150 МВт. Генератор оснащён регулятором скорости, который осуществляет регулирование по пропорционально-дифференциальному закону. Регулирование возбуждения не осуществляется. В качестве возмущающего воздействия выступает включение нагрузки 10 МВт в 5 секунд. Из первой части выводится сигнал разности моментов на валу генератора ΔM , который является входящим сигналом u для второй и третьей части схемы.

Вторая часть «Generator» – это система уравнений (3), собранная для генератора с теми же параметрами, что и в первой части модели. Третья часть «Kalman Filter» – система уравнений фильтра Калмана (4).

Во второй и третьей части модели есть блоки, позволяющие выводить переменные состояния x и выхода y для построения графиков.

На данной модели приняты обозначения:

f, ksi – моделируемые сигналы внешних возмущений и помехи измерений;

$X, Y, Yksi$ – вектор состояния объекта, вектор измерения без учета выходной помехи и с ее учетом соответственно;

Xk, Yk – вектор состояния и вектор измерения фильтра Калмана (т.е. оценки вектора состояния и вектора измерения объекта).

Запись $A*uvеc, B*uvеc, C*uvеc$ и $L*uvеc$ обозначает векторное умножение матриц

A, B, C или L на соответствующий входной сигнал.

Для моделирования возмущающих воздействий и помех измерения использовался блок «Band-Limited White Noise». Спектральная плотность сигнала f для угла и скорости – 0,005, сигнала ξ – 0,0001.

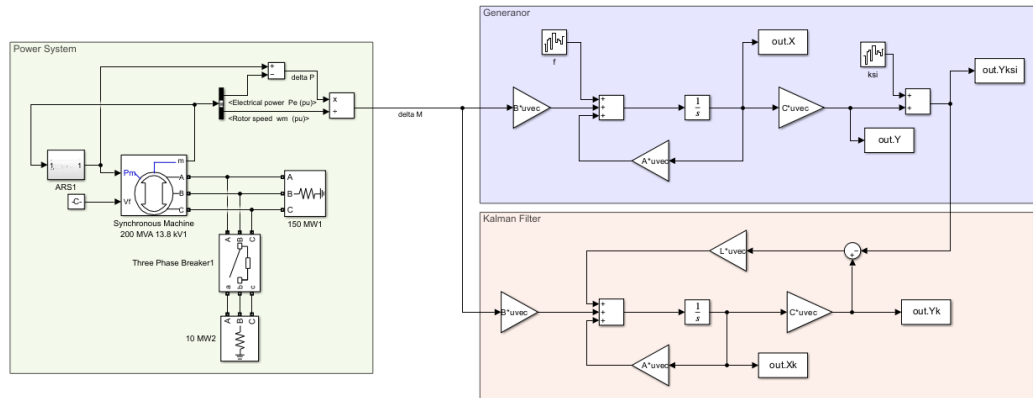


Рис. 1. Модель в MATLAB Simulink

Fig. 1. Model in MATLAB Simulink

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

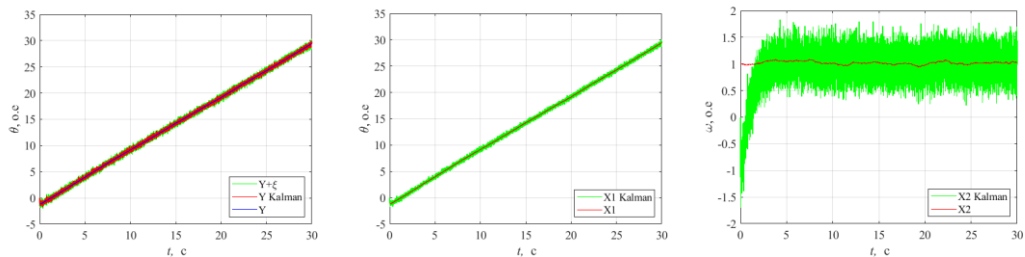


Рис. 2. Осциллограммы сигналов выхода и состояний при $Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$ $R = [0,001]$ Fig. 2. Output and state oscillograms at $Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$ $R = [0,001]$

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

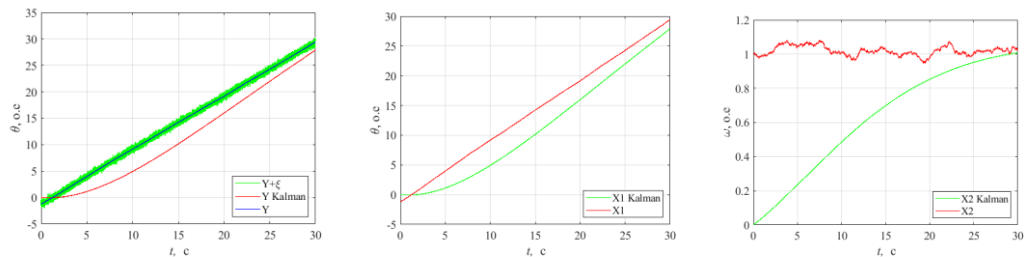


Рис. 3. Осциллограммы сигналов выхода и состояний при $Q = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix}$ $R = [100]$ Fig. 3. Output and state oscillograms at $Q = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix}$ $R = [100]$

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

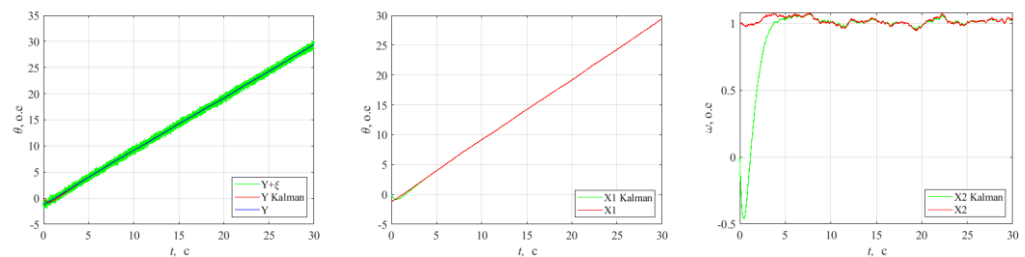


Рис. 4. Осциллограммы сигналов выхода и состояний при $Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$ $R = [1]$ Fig. 4. Output and state oscillograms at $Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$ $R = [1]$

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

При выполнении экспериментов выбирались различные величины компонентов матриц Q и R для определения их влияния на качество оценки переменных состояния x и фильтрации выходного сигнала y .

В первом опыте матрица спектральных плотностей возмущающего сигнала была взята большой $Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$, нули вне главной диагонали означают, что корреляция между возмущениями угла и скорости отсутствует. Матрица спектральной плотности помехи измерения выходного сигнала была принята маленькой $R = [0,001]$. Такая тактика в выборе матриц спектральных плотностей справедлива, если есть основания полагать, что возмущение f большое, а помеха ζ маленькая. В этом случае матрица фильтра Калмана получается с большими коэффициентами $L = \begin{bmatrix} -1001 \\ -1012 \end{bmatrix}$. При выполнении эксперимента предполагалось, что начальные значения угла θ и скорости ω не известны, поэтому большие коэффициенты матрицы L позволили добиться быстрой сходимости параметров, однако возник негативный эффект. Фильтр Калмана действует таким образом, как будто помех в выходном сигнале практически нет, и сигнал $\hat{y}$ повторяет по форме сигнал y . В итоге сигналы оценки сигналов $\hat{x}$ и $\hat{y}$ сильно зашумлены. Особенно наглядно степень зашумлённости видна если сравнить исходный и оцененный сигнал скорости (рис. 2).

Во втором опыте матрица Q была выбрана маленькой ($Q = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix}$), а матрица R большой ($R = [100]$). В результате, матрица L получилась с маленькими коэффициентами ($L = \begin{bmatrix} -0,14 \\ -0,01 \end{bmatrix}$). Результаты этого эксперимента получились противоположными. Маленькие коэффициенты матрицы L привели к долгой сходимости оцененных параметров к реальным, что делает практически невозможным использование такой оценки для задач управления в реальном времени, например для регулятора скорости. Фильтр воспринимает выходной сигнал, как сильно искажённый, из-за чего возникает большая инерция в движении оценки сигналов к реальным (рис. 3).

В третьем опыте были приняты следующие значения $Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$ и $R = [1]$. В результате расчёта матрица коэффициентов фильтра имеет следующий вид $L = \begin{bmatrix} -3,07 \\ -2,22 \end{bmatrix}$.

В этом случае ошибка между оцененными параметрами и реальными отсутствует (рис. 4). Такой результат можно объяснить тем, что спектральные плотности сигналов $f(0,005)$ и $\zeta(0,0001)$ имеют такое же соотношение, что и коэффициенты в матрицах Q и R .

Заключение или Выводы (Conclusions)

В ходе экспериментов было установлено, что, выбирая матрицы Q и R , можно влиять на скорость схождения оцениваемых параметров к реальным параметрам. Причём влияет не столько величина коэффициентов, сколько разница между ними. Чем больше Q по отношению к R , тем быстрее сходится оценка. В обратном случае результат противоположный.

В случае если возмущающие воздействия и помехи измерения представляют из себя белый шум, то, зная мощности их спектральных плотностей, фильтр Калмана позволяет определить параметры состояния и выходов объекта таким образом, что ошибка будет стремиться к нулю.

Аналогичные результаты можно получить, если возмущения и помехи будут не случайными, а детерминированными сигналами. Тогда задача сводится к более простой.

Литература

1. D. Luenberger, "An introduction to observers," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 16, no. 6, pp. 596-602, December 1971, doi: 10.1109/TAC.1971.1099826
2. V. Radaisavljevic-Gajic and F. O. M. Safieh, "Discrete-Time Optimal Quadratic Performance Loss of a Linear Reduced Order Observer Based Controller Designed via a Sylvester Equation," 2024 4th International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Male, Maldives, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECCME62383.2024.10796489. P. V. S. Nag,

- C. S. Kumar, K. C. S. thampatty and T. B. Isha, "A modified approach for application of Augmented Extended Kalman filter for stator interturn fault diagnosis of a synchronous generator," 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), Chennai, India, 2018, pp. 465-469, doi: 10.1109/ICEES.2018.8442354.
3. J. Carvalho, K. Datta and Yoopyo Hong, "A new block algorithm for full-rank solution of the Sylvester-observer equation," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 48, no. 12, pp. 2223-2228, Dec. 2003, doi: 10.1109/TAC.2003.820150.
4. K. -X. Cui and G. -R. Duan, "Adaptive Disturbance Observer Design for Discrete-Time High-Order Fully Actuated Systems Based on LMI and Its Application to Combined Spacecrafts," 2023 2nd Conference on Fully Actuated System Theory and Applications (CFASTA), Qingdao, China, 2023, pp. 12-17, doi: 10.1109/CFASTA57821.2023.10243313.
5. K. -X. Cui and G. -R. Duan, "Adaptive Disturbance Observer Design for Discrete-Time High-Order Fully Actuated Systems Based on LMI and Its Application to Combined Spacecrafts," 2023 2nd Conference on Fully Actuated System Theory and Applications (CFASTA), Qingdao, China, 2023, pp. 12-17, doi: 10.1109/CFASTA57821.2023.10243313.
6. R. Molavi, K. Shojaee and D. A. Khaburi, "Optimal vector control of permanent magnet synchronous motor," 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, Malaysia, 2008, pp. 249-253, doi: 10.1109/PECON.2008.4762479.
7. M. Ai, Y. Sun and X. Lv, "Dynamic state estimation for synchronous machines based on interpolation H_∞ extended Kalman filter," 2018 33rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), Nanjing, China, 2018, pp. 555-559, doi: 10.1109/YAC.2018.8406436.
8. L. Peng, L. Xie, F. Wu and C. Li, "Field-oriented control of synchronous motor based on adaptive extended Kalman filter," 2011 IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems, Beijing, China, 2011, pp. 633-637, doi: 10.1109/CCIS.2011.6045146.
9. P. S. Madhukar and L. B. Prasad, "State Estimation using Extended Kalman Filter and Unscented Kalman Filter," 2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3), Lakshmangarh, India, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICONC345789.2020.9117536.
10. A. I. Ilieș, G. Chindriș and D. Pitiță, "A Comparison between State of Charge Estimation Methods: Extended Kalman Filter and Unscented Kalman Filter," 2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Pitesti, Romania, 2020, pp. 376-381, doi: 10.1109/SIITME50350.2020.9292232.
11. K. Kyslan, V. Šlapák, V. Petro, A. Marcinek and F. Ďurovský, "Speed Sensorless Control of PMSM with Unscented Kalman Filter and Initial Rotor Alignment," 2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), The High Tatras, Slovakia, 2019, pp. 373-378, doi: 10.1109/EDPE.2019.8883918.
12. Y. Li, J. Li, J. Qi and L. Chen, "Robust Cubature Kalman Filter for Dynamic State Estimation of Synchronous Machines Under Unknown Measurement Noise Statistics," in IEEE Access, vol. 7, pp. 29139-29148, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2900228.
13. Huang, Jian & Ma, Zhixun. (2023). Sensorless Control of Synchronous Reluctance Machines Based on Improved Kalman Filter-Phase Locked Loop. 4602-4605. 10.1109/ICEMS59686.2023.10344934.
14. Y. Li, M. Aït-Ahmed, N. Aït-Ahmed, W. Shi and Z. Zhou, "LQR Control Speed and Voltage of Synchronous Alternator," 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, China, 2010, pp. 617-620, doi: 10.1109/ICICTA.2010.503.
15. M. A. M. Cheema, J. E. Fletcher, D. Xiao and M. F. Rahman, "A Linear Quadratic Regulator-Based Optimal Direct Thrust Force Control of Linear Permanent-Magnet Synchronous Motor," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 5, pp. 2722-2733, May 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2519331.
16. R. Molavi, K. Shojaee and D. A. Khaburi, "Optimal vector control of permanent magnet synchronous motor," 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, Malaysia, 2008, pp. 249-253, doi: 10.1109/PECON.2008.4762479.
17. F. R. Badal, S. K. Sarkar and S. K. Das, "High Performance ILQG Controller Design to Enhance Dynamic Stability of Multimachine Power System," 2018 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (iCEEICT), Dhaka, Bangladesh, 2018, pp. 142-147, doi: 10.1109/CEEICT.2018.8628063.
18. Обзор методов определения параметров моделей синхронных генераторов / А. С. Бердин, А. Н. Мойсейченко, П. Ю. Коваленко [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 103-111. – DOI 10.14529/power200412.

Авторы публикации

Фролов Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, зав. кафедрой «Автоматизированных электроэнергетических систем» (АЭЭС) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), г. Новосибирск, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-4408-0316>, *Email*: myu.frolov@gmail.com

References

1. D. Luenberger, "An introduction to observers," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 16, no. 6, pp. 596-602, December 1971, doi: 10.1109/TAC.1971.1099826
2. V. Radaisavljevic-Gajic and F. O. M. Safieh, "Discrete-Time Optimal Quadratic Performance Loss of a Linear Reduced Order Observer Based Controller Designed via a Sylvester Equation," 2024 4th International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Male, Maldives, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECCME62383.2024.10796489. P. V. S. Nag, C. S. Kumar, K. C. S. thampatty and T. B. Isha, "A modified approach for application of Augmented Extended Kalman filter for stator interturn fault diagnosis of a synchronous generator," 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), Chennai, India, 2018, pp. 465-469, doi: 10.1109/ICEES.2018.8442354.
3. J. Carvalho, K. Datta and Yoopyo Hong, "A new block algorithm for full-rank solution of the Sylvester-observer equation," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 48, no. 12, pp. 2223-2228, Dec. 2003, doi: 10.1109/TAC.2003.820150.
4. K. -X. Cui and G. -R. Duan, "Adaptive Disturbance Observer Design for Discrete-Time High-Order Fully Actuated Systems Based on LMI and Its Application to Combined Spacecrafts," 2023 2nd Conference on Fully Actuated System Theory and Applications (CFASTA), Qingdao, China, 2023, pp. 12-17, doi: 10.1109/CFASTA57821.2023.10243313.
5. K. -X. Cui and G. -R. Duan, "Adaptive Disturbance Observer Design for Discrete-Time High-Order Fully Actuated Systems Based on LMI and Its Application to Combined Spacecrafts," 2023 2nd Conference on Fully Actuated System Theory and Applications (CFASTA), Qingdao, China, 2023, pp. 12-17, doi: 10.1109/CFASTA57821.2023.10243313
6. R. Molavi, K. Shojaei and D. A. Khaburi, "Optimal vector control of permanent magnet synchronous motor," 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, Malaysia, 2008, pp. 249-253, doi: 10.1109/PECON.2008.4762479.
7. M. Ai, Y. Sun and X. Lv, "Dynamic state estimation for synchronous machines based on interpolation H_∞ extended Kalman filter," 2018 33rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), Nanjing, China, 2018, pp. 555-559, doi: 10.1109/YAC.2018.8406436.
8. L. Peng, L. Xie, F. Wu and C. Li, "Field-oriented control of synchronous motor based on adaptive extended Kalman filter," 2011 IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems, Beijing, China, 2011, pp. 633-637, doi: 10.1109/CCIS.2011.6045146.
9. P. S. Madhukar and L. B. Prasad, "State Estimation using Extended Kalman Filter and Unscented Kalman Filter," 2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3), Lakshmangarh, India, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICONC345789.2020.9117536.
10. A. I. Ilieș, G. Chindriș and D. Pitiță, "A Comparison between State of Charge Estimation Methods: Extended Kalman Filter and Unscented Kalman Filter," 2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Pitesti, Romania, 2020, pp. 376-381, doi: 10.1109/SIITME50350.2020.9292232.
11. K. Kyslan, V. Šlapák, V. Petro, A. Marcinek and F. Ďurovský, "Speed Sensorless Control of PMSM with Unscented Kalman Filter and Initial Rotor Alignment," 2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), The High Tatras, Slovakia, 2019, pp. 373-378, doi: 10.1109/EDPE.2019.8883918
12. Y. Li, J. Li, J. Qi and L. Chen, "Robust Cubature Kalman Filter for Dynamic State Estimation of Synchronous Machines Under Unknown Measurement Noise Statistics," in IEEE Access, vol. 7, pp. 29139-29148, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2900228.
13. Huang, Jian & Ma, Zhixun. (2023). Sensorless Control of Synchronous Reluctance Machines Based on Improved Kalman Filter-Phase Locked Loop. 4602-4605. 10.1109/ICEMS59686.2023.10344934.
14. Y. Li, M. Ait-Ahmed, N. Ait-Ahmed, W. Shi and Z. Zhou, "LQR Control Speed and Voltage of Synchronous Alternator," 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, China, 2010, pp. 617-620, doi: 10.1109/ICICTA.2010.503.
15. M. A. M. Cheema, J. E. Fletcher, D. Xiao and M. F. Rahman, "A Linear Quadratic Regulator-Based Optimal Direct Thrust Force Control of Linear Permanent-Magnet Synchronous Motor," in IEEE

Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 5, pp. 2722-2733, May 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2519331.

16. R. Molavi, K. Shojaei and D. A. Khaburi, "Optimal vector control of permanent magnet synchronous motor," 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, Malaysia, 2008, pp. 249-253, doi: 10.1109/PECON.2008.4762479.

17. F. R. Badal, S. K. Sarkar and S. K. Das, "High Performance ILQG Controller Design to Enhance Dynamic Stability of Multimachine Power System," 2018 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (iCEEICT), Dhaka, Bangladesh, 2018, pp. 142-147, doi: 10.1109/CEEICT.2018.8628063.

18. Obzor metodov opredeleniya parametrov modelej sinhronnyh generatorov / A. S. Berdin, A. N. Mojsejchenkov, P. Yu. Kovalenko [i dr.] // Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika – 2020. – T. 20, № 4. – С. 103-111. – DOI 10.14529/power200412.

Authors of the publication

Mikhail Yu. Frolov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-4408-0316>, Email: myu.frolov@gmail.com

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено 26.03.2025 г.

Отредактировано 10.08.2025 г.

Принято 12.08.2025 г.